С. А. ШЕСТОВ



ЭТА КНИГА О ПРИБОРАХ,
БЕЗ КОТОРЫХ НЕ БЫЛО БЫ
КОСМИЧЕСКИХ СТАРТОВ,
РЕЙСОВ АТОМНЫХ КОРАБЛЕЙ
И ПОЛЕТОВ АВИАЛАЙНЕРОВ



С.А. ШЕСТОВ

ГИРОСКОП НА ЗЕМЛЕ, В НЕБЕСАХ И НА МОРЕ

Издательство „Знание“
Москва
1989

ББК 30
Ш 51

Автор: Станислав Алексеевич ШЕСТОВ — кандидат технических наук, доцент МВТУ им. Н. Э. Баумана, автор более пятидесяти научных и учебно-методических работ, соавтор учебника «Гироскопические системы».

Рецензенты: В. Ф. Журавлев — доктор физико-математических наук; Л. А. Северов — доктор технических наук.

Автор предисловия член-корреспондент АН СССР Д. М. Климов.

Редактор *С. Н. ПОПОВА*.

Шестов С. А.

Ш 51 Гироскоп на земле, в небесах и на море. — М.: Знание, 1989. — 192 с.
ISBN 5-07-000061-6

45 к. 50000 экз.

Эта книга о приборах, без которых не было бы длительных орбитальных и межпланетных полетов, рейсов атомных кораблей и сверхзвуковых авиалайнеров, — о гироскопических системах ориентации, стабилизации и навигации, об устройстве и работе гироскопических приборов и систем, об основных этапах их развития.

Для широкого круга читателей.

Ш $\frac{1603030000-009}{073(02)-89}$ 19—89 **ББК 30**

ISBN 5-07-000061-6



ПРЕДИСЛОВИЕ

Слово «гироскоп», изобретенное в 1852 году французским физиком Леоном Фуко, может быть переведено на русский язык как «наблюдатель вращения». Построив лабораторный прибор с таким же названием, основой которого был быстровращающийся маховик, Л. Фуко хотел с его помощью наблюдать вращение Земли относительно «неподвижных» звезд. И хотя опыт с первым гироскопом был не совсем удачным, совершенствование и применение гироскопических приборов пошло быстро нарастающими темпами, поскольку они были необходимы для мореплавания.

Первым крупным успехом гироскопической техники было создание гироскопического компаса, давшего «зрение» надводному и подводному флоту. С развитием авиации круг применений гироскопических приборов и систем расширился; космонавтика сделала этот круг необычайно широким.

Если учесть еще задачи, решаемые гироприборами на поверхности Земли, то название этой книги следует рассматривать не как образное преувеличение, а как отражение действительного положения дел. В настоящее время ни один подвижный объект — самолет, корабль, ракета, космический корабль — не обходится без гироскопических приборов. Более того, точность систем управления, ориентации и навигации в первую очередь определяется точностью гироскопических приборов, так как именно они являются датчиками исходной навигационной информации.

Возникнув как чисто механические, гироскопические приборы в процессе своего развития «впитывали» все

последние достижения не только в механике, но и в других областях знания. Современная гироскопическая система — это органическое соединение достижений механики, электроники, автоматики, электротехники, вычислительной техники и многих других наук.

Цель книги — познакомить широкий круг читателей, и в первую очередь молодежь, с увлекательным миром проблем и задач современной гироскопической науки и техники.

Гироскопическая техника сложна, а рассказать о ней нужно просто и доступно, но достаточно строго. Это противоречие автор успешно преодолевает, прослеживая основные этапы развития гироскопических приборов и систем от их зарождения до современного уровня. При таком подходе к изложению появилась возможность затронуть не только технические, но и такие важные для понимания материала вопросы, как появление объективной необходимости создания гироприбора и решения с его помощью практической задачи, привести первые простейшие (а потому доступные для понимания неподготовленным читателем) схемы гироскопических приборов, показать во всей сложности и привлекательности процесс технического творчества, отметить вклад советских и зарубежных ученых в развитие гироскопической техники.

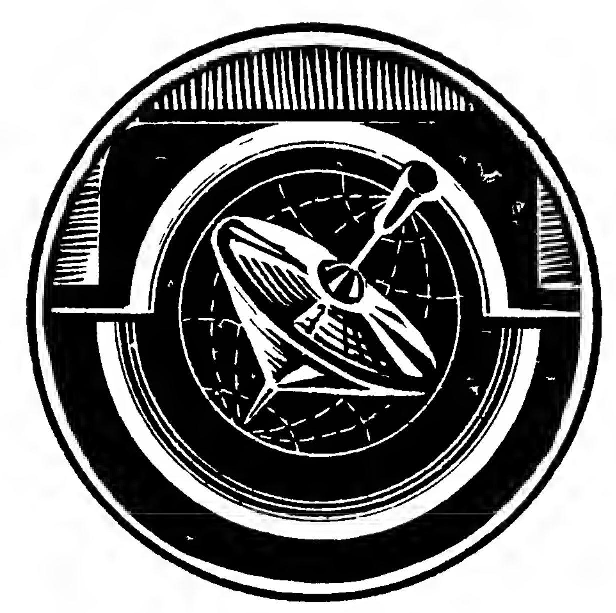
Мне представляется, что эта книга будет интересна и полезна широкому кругу читателей — от школьников и студентов до инженеров и научных работников.

Член-корреспондент АН СССР
Д. М. КЛИМОВ



*С берега Вселенной,
которым стала священная земля нашей Родины,
не раз уйдут в неизведанные дали советские корабли,
поднимаемые мощными ракетами-носителями.
Их полет и возвращение
будут великим праздником советского народа,
всего передового человечества —
победой разума
и прогресса.*

**Академик Сергей Павлович
Королев**



ВНАЧАЛЕ БЫЛ ВОЛЧОК...

ГЛАВА I

Динамика твердых тел чрезвычайно сложна. Клейн и Зоммерфельд, к примеру, посвятили целых четыре тома только движению волчков — их читают те, кто меньше всего склонен забавляться этими игрушками

Л. Купер, физик, лауреат Нобелевской премии

Обыкновенный детский волчок не только развлекает, но и ставит задачи, зовет к творчеству. Объяснение движения волчка сложно, нужна подготовительная работа — знакомство с самыми необходимыми понятиями механики: абсолютное пространство, прямолинейное и криволинейное движения, силы инерции, векторы, ускорение и силы Кориолиса

«Инструмент философов»

Волчок... Наверное, нет человека, не любовавшегося его мягким таинственным движением. Вспоминаю суровую осень 1941 г Нас, эвакуированных, потеснившись и поделившись необходимым, приютили в своих добротных рубленых избах солдатки-сибирячки. У нашей хозяйки было трое сыновей У старшего, семилетнего Коли, было сокровище. Ему завидовали все сверстники деревни. Сокровище это — старые, отработавшие свой век часы-ходики, а ценились они потому, что из них можно было доставать зубчатые колесики (шестеренки), прочно насаженные на тонкие стальные оси. Помню, как в первый же вечер меня, все время жавшегося к матери, властно позвал Коля: «Эй ты! Иди играть в волчки». Я неуверенно подошел и сказал, что играть в волчки не умею. Тогда он объяснил: «Вот видишь, шестеренка с осью. Это и есть волчок. Пока она не кру-

тится, она лежит на боку, а если ее раскрутить, то она будет стоять на ножке. Вот тебе шестеренка, крути!» И он, взявшись за верхнюю часть оси (головку), крутанул шестеренку. К моему удивлению, шестеренка действительно осталась стоять на ножке, но зато у нее исчезли дырочки и зубчики. Некоторое время шестеренка стояла на ножке (**устойчивость волчка**), а затем головка ее отклонилась в сторону и стала медленно и плавно описывать круги (**прецессия волчка**).

Почему же не падает волчок? Почему, «устав» стоять на ножке, он отклоняет головку и начинает плавно вращать ею? Может быть, вращаясь, волчок оживает? Долгие годы люди размышляли над этим и терялись в догадках.

Первые упоминания о волчке и его необыкновенных свойствах относятся к глубокой древности. До наших дней дошли такие игрушки, изготовленные в Китае в III тыс. до н. э.

В Историческом музее среди экспонатов, относящихся к началу нашей эры, есть волчки-рулетки. На их оси насажены не круглые, а многоугольные диски. На каждой грани диска написана цифра. Видимо, игра состояла в том, что, назначив ставки и объявив «свои» цифры, играющие запускали волчок. Через некоторое время, проходившее для игроков в волнующем ожидании, волчок останавливался и падал на одну из граней. Ставки забирал тот, чья цифра оказывалась на верхней грани лежащего волчка.

Шли столетия, но интерес к волчку и его загадкам не падал. Им интересовались продавцы игрушек, серьезные ученые, моряки и даже художники.

В Париже, в Лувре хранится картина «Мальчик с волчком», написанная в 1738 г. Ее автор Жан Батист Симеон Шарден — выдающийся французский живописец, академик, крупнейший представитель реалистической живописи XVIII в. На картине изображен мальчик лет двенадцати, наблюдающий за волчком, вращающимся на столе, на котором лежат книги и письменные принадлежности. Две детали картины привлекают внимание зрителя: это волчок со слегка отклоненной осью, движение которого ощущается почти физически, и лицо мальчика, не по-детски серьезное, напряженное; зрителю ясно — мальчик пытается сам постичь тайну волчка (ведь в книгах об этом еще почти ничего не написано).

Однако фундаментальные законы механики, которым, безусловно, подчиняется движение волчка, уже открыты великим Ньютоном. Задача теперь в том, как применить эти законы для понимания поведения волчка. Сам Ньютон сделал это блестяще, объяснив прецессию большого волчка — Земли, открытую еще во II в. до н. э. греческим астрономом Гиппархом. Но об этом позже...

Любопытны и многие другие встречающиеся в литературе упоминания о волчках. Вот лишь некоторые из них. Известный западногерманский ученый-механик К. Магнус писал: «Удивительный волчок, тысячи лет служивший занимательной игрушкой, очаровал в свое время и классиков механики. Астроном сэр Джон Гершель называл его инструментом философов».

В XVIII и XIX вв. волчки стали излюбленной моделью, к которой прибегали физики, стремясь объяснить те или иные явления. Даже Максвелл, создавая теорию электромагнитных явлений, прибегал к механическим моделям, большую роль в которых играли волчки, помещенные в различные точки пространства. Выдающийся физик первой половины XX в. Энрико Ферми (1901—1954) начал свой путь в науку, пытаясь постичь тайны волчков и гироскопов. Вот что писал о 13-летнем Энрико друг семьи Ферми инженер Амидей: «Впоследствии я узнал, что Энрико изучал математику и физику по случайным книгам, которые покупал в букинистических магазинах на рынке Камподей-Фьори. Он надеялся, в частности, найти в этих книгах теорию, объясняющую движение волчков и гироскопов. Объяснения он так и не нашел. Но, возвращаясь к этой проблеме снова и снова, мальчик самостоятельно приблизился к разъяснению природы загадочного движения волчка»

Американский инженер Эльмер Сперри уже имел ряд серьезных изобретений в области электротехники, когда в 1904 г. купил своим детям забавную игрушку — волчок. Неизвестно, понравилась ли игрушка детям, но папа увлекся ею, предугадав в использовании удивительных свойств волчка — устойчивости и прецессии — неограниченные возможности для творчества.

Изучив немногочисленные тогда труды по волчкам и гироскопам, Э. Сперри начал работать над актуальнейшей проблемой того времени — созданием для морского флота компаса без магнита (гироскопического компаса).

В 1908 г. Э. Сперри собственноручно изготовил образец гирокомпаса, который достаточно успешно прошел испытания. Успех окрылил изобретателя. В 1910 г. была создана фирма «Сперри», которая стала выпускать гирокомпасы для военных кораблей, а позднее другие гироскопические приборы и автопилоты.

Один из основоположников конструирования и производства отечественных гироскопических приборов Николай Николаевич Остряков (1904—1946) уже в раннем детстве был «очарован» волчком, который, по словам академика А. Ю. Ишлинского, «запускал без устали».

Гироскопические приборы, разработанные и изготовленные под руководством Н. Н. Острякова, помогали громить врага в годы Великой Отечественной войны.

В представлении на присвоение Н. Н. Острякову ученой степени доктора технических наук без защиты диссертации академик А. Н. Крылов отметил, что, подобно выдающимся механикам прошлого, Николай Николаевич «...осуществлял свои творения не пером на бумаге, а резцом из меди и стали».

Итак, гироскопическая техника началась с волчка, с его удивительных свойств, с которыми стоит познакомиться подробнее. Однако, чтобы понять эти свойства, нужно затратить некоторое время и усилия на подготовительную работу — знакомство с физическим смыслом самых необходимых для дальнейшего изложения понятий механики.

Подготовительная работа всегда трудна и не для всех интересна. Она как подъем в гору: пока поднимаешься — тяжело, почти ничего не видно, мучает вопрос — зачем все это? Но, достигнув вершины, убеждаешься, что труд затрачен не зря — перед тобой ясные дали...

«Нет ничего древнее движения»

Движение изучает наука, называемая механикой. Механика зародилась в Древней Греции примерно в V в. до н. э. Видимо, одним из первых объектов ее исследования была механе—подъёмная машина, применявшаяся в театре для подъема и опускания актеров, изображавших богов. Отсюда и произошло название науки.

Люди уже давно заметили, что они живут в мире

движущихся предметов — качаются деревья, летят птицы, плывут корабли, поражают цели стрелы, выпущенные из лука. Причины подобных загадочных тогда явлений занимали умы древних и средневековых ученых.

В 1638 г. Галилео Галилей писал: «В природе нет ничего древнее движения, и о нем философы написали томов немало и немалых». Древние и особенно ученые средневековья и эпохи Возрождения (Леонардо да Винчи, Н. Коперник, Г. Галилей, И. Кеплер, Р. Декарт и др.) уже правильно толковали отдельные вопросы движения, однако в целом ясного понимания законов движения во времена Галилея не было.

Учение о движении тел впервые предстает как строгая, последовательная наука, построенная, как и геометрия Евклида, на истинах, не требующих доказательств (аксиомах), в фундаментальном труде Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии», изданном в 1687 г. Оценивая вклад в науку ученых-предшественников, великий Ньютон сказал: «Если мы видели дальше других, то это потому, что стояли на плечах гигантов».

Движения вообще, движения, безотносительного к чему-либо, нет и быть не может. Движение тел может происходить только относительно других тел и связанных с ними пространств. Поэтому в начале своего труда Ньютон решает принципиально важный вопрос о пространстве, относительно которого будет изучаться движение тел.

Чтобы придать конкретность этому пространству, Ньютон связывает с ним систему координат, состоящую из трех взаимно перпендикулярных осей.

Ньютон вводит понятие **абсолютное пространство,** которое определяет так: «Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным». Определение пространства как неподвижного тождественно предположению о существовании абсолютно неподвижной системы координат, относительно которой рассматривается движение материальных точек и твердых тел.

В качестве такой системы координат Ньютон принимал гелиоцентрическую систему, начало которой он помещал в центр Солнца, а три воображаемых взаимно перпендикулярных оси направлял к трем «неподвижным»

звездам. Но сегодня известно, что в мире нет ничего абсолютно неподвижного — Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца, Солнце движется относительно центра Галактики, Галактика — относительно центра мира и т. д.

Таким образом, если говорить строго, то абсолютно неподвижной системы координат не существует. Однако движение «неподвижных» звезд относительно Земли настолько медленное, что для большинства задач, решаемых людьми на Земле, этим движением можно пренебречь и считать «неподвижные» звезды действительно неподвижными, а абсолютно неподвижную систему координат, предложенную Ньютоном, действительно существующей.

По отношению к абсолютно неподвижной системе координат Ньютон сформулировал свой первый закон (аксиому): «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние».

С тех пор предпринимались и предпринимаются попытки редакционно улучшить формулировку Ньютона. Один из вариантов формулировок звучит так: «Тело, движущееся в пространстве, стремится сохранить величину и направление своей скорости» (имеется в виду, что покой — это движение со скоростью, равной нулю). Здесь уже вводится понятие одной из важнейших характеристик движения — поступательной, или линейной, скорости. Обычно линейная скорость обозначается V.

Обратим внимание на то, что в первом законе Ньютона говорится только о поступательном (прямолинейном) движении. Однако всем известно, что в мире существует и другое, более сложное движение тел — криволинейное, но о нем позже...

Стремление тел «удерживаться в своем состоянии» и «сохранять величину и направление своей скорости» называется инертностью, или инерцией, тел. Слово «инерция» латинское, в переводе на русский оно означает «покой», «бездействие». Интересно отметить, что инерция — органическое свойство материи вообще, «врожденная сила материи», как говорил Ньютон. Она свойственна не только механическому движению, но и другим явлениям природы, например электрическим, магнитным, тепловым. Инерция проявляется и в жизни общества, и в

поведении отдельных людей. Но вернемся к механике.

Мерой инерции тела при его поступательном движении является масса тела, обозначаемая обычно m. Установлено, что при поступательном движении на величину инерции не влияет распределение массы внутри объема, занимаемого телом. Это дает основание при решении многих задач механики отвлечься от конкретных размеров тела и заменить его материальной точкой, масса которой равна массе тела.

Местоположение этой условной точки в объеме, занимаемом телом, называется центром масс тела, или, что почти то же самое, но более знакомо, центром тяжести.

Мерой механического прямолинейного движения, предложенной еще Р. Декартом в 1644 г., является количество движения, определяемое как произведение массы тела на его линейную скорость: mV.

Как правило, движущиеся тела не могут продолжительное время сохранять неизменным величину количества своего движения: расходуются в полете запасы топлива, уменьшая массу летательных аппаратов, тормозятся и разгоняются поезда, изменяя свою скорость. Какая же причина вызывает изменение количества движения? Ответ на этот вопрос дает второй закон (аксиома) Ньютона, который в современной формулировке звучит так: скорость изменения количества движения материальной точки равна силе, действующей на эту точку.

Итак, причиной, вызывающей движение тел (если вначале $mV=0$) или изменяющей их количество движения (если вначале $mV\neq0$) относительно абсолютного пространства (других пространств Ньютон не рассматривал), являются силы. Эти силы позже получили уточняющие названия — физические, или Ньютоновы, силы. Они обычно обозначаются F.

Сам Ньютон дал следующее определение физическим силам: «Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения». Существует много других определений силы. Л. Купер и Э. Роджерс — авторы замечательных популярных книг по физике, избегая скучноватых строгих определений силы, с известной долей лукавства вводят свое определение: «Силы — это то, что тянет и толкает». До конца не ясно, но какое-то представление о том, что такое сила, появляется.

К физическим силам относятся: силы тяготения, элек

трические, магнитные, силы упругости и пластичности, силы сопротивления среды, давления света и многие другие.

Если во время движения тела его масса не меняется (только этот случай будет рассматриваться в дальнейшем), то формулировка второго закона Ньютона значительно упрощается: «Действующая на материальную точку сила равна произведению массы точки на изменение ее скорости».

Изменение линейной скорости тела или точки (по величине или направлению — запомним это) называется линейным ускорением тела или точки и обозначается обычно a.

Ускорения и скорости, с которыми тела движутся относительно абсолютного пространства, называются абсолютными ускорениями и скоростями.

Кроме абсолютной системы координат, можно представить себе (конечно, с какими-то допущениями) другие системы координат, которые движутся относительно абсолютной прямолинейно и равномерно. Поскольку (согласно первому закону Ньютона) покой и равномерное прямолинейное движение эквивалентны, то в таких системах справедливы законы Ньютона, в частности первый закон — закон инерции. По этой причине системы координат, движущиеся равномерно и прямолинейно относительно абсолютной системы, получили название инерциальных систем координат.

Однако в большинстве практических задач людей интересует движение тел не относительно далекого и неосязаемого абсолютного пространства и даже не относительно инерциальных пространств, а относительно других более близких и вполне материальных тел, например пассажира относительно кузова автомобиля. Но эти другие тела (и связанные с ними пространства и системы координат) сами движутся относительно абсолютного пространства непрямолинейно и неравномерно. Системы координат, связанные с такими телами, получили название подвижных. Впервые подвижные системы координат использовал для решения сложных задач механики Л. Эйлер (1707—1783).

С примерами движения тел относительно других подвижных тел мы постоянно встречаемся в нашей жизни. Плывут по морям и океанам корабли, перемещаясь относительно поверхности Земли, вращающейся в абсо-

лютном пространстве; движется относительно стен мчащегося пассажирского вагона проводник, разносящий чай по купе; выплескивается чай из стакана при резких толчках вагона и т. д.

Для описания и изучения столь сложных явлений вводятся понятия переносного движения и относительного движения и соответствующих им переносных и относительных скоростей и ускорений.

В первом из приведенных примеров вращение Земли относительно абсолютного пространства будет переносным движением, а перемещение корабля относительно поверхности Земли — относительным движением.

Чтобы изучить движение проводника относительно стен вагона, нужно прежде принять, что вращение Земли существенного влияния на движение проводника не оказывает и поэтому Землю в данной задаче можно считать неподвижной. Тогда движение пассажирского вагона — движение переносное, а движение проводника относительно вагона — движение относительное. При относительном движении тела воздействуют друг на друга или непосредственно (соприкасаясь), или на расстоянии (например, магнитные и гравитационные взаимодействия).

Характер этих воздействий определяется третьим законом (аксиомой) Ньютона. Если вспомнить, что физические силы, приложенные к телам, Ньютон назвал действием, то третий закон может быть сформулирован так: «Действие равно противодействию». Следует отметить, что действие приложено к одному, а противодействие — к другому из двух взаимодействующих тел. Действие и противодействие не уравновешиваются, а вызывают ускорения взаимодействущих тел, причем с большим ускорением движется то тело, масса которого меньше.

Напомним также, что третий закон Ньютона в отличие от первых двух справедлив в любой системе координат, а не только в абсолютной или инерциальных.

Кроме прямолинейного движения, в природе широко распространено криволинейное движение, простейшим случаем которого является движение по окружности. Только этот случай мы и будем рассматривать в дальнейшем, называя движение по окружности круговым движением. Примеры кругового движения: вращение Земли вокруг своей оси, движение дверей и качелей, вращение бесчисленных колес.

Круговое движение тел и материальных точек мо-

жет происходить либо вокруг осей, либо вокруг точек.

Круговое движение (так же, как и прямолинейное) может быть абсолютным, переносным и относительным.

Как и прямолинейное, круговое движение характеризуется скоростью, ускорением, силовым фактором, мерой инерции, мерой движения. Количественно все эти характеристики в очень сильной степени зависят от того, на каком расстоянии от оси вращения находится вращающаяся материальная точка. Это расстояние называется радиусом вращения и обозначается r.

Физический смысл характеристик кругового движения можно пояснить на примере тела, состоящего из материальных точек и вращающегося вокруг какой-либо оси. При этом будем считать, что каждая материальная точка тела имеет свои массу m_i, радиус вращения r_i, линейные (касательные к траектории движения) скорости V_i и ускорение a_i, а также, что к каждой точке в направлении ее ускорения приложена физическая сила F_i. Тогда характеристиками кругового движения этого тела будут: угловая скорость $\omega = V_i / r_i$; момент сил $M = \Sigma r_i \times \times F_i$ — так называемый силовой фактор; r_i в данном случае часто называют плечом силы F_i; момент инерции тела относительно оси вращения $I = \Sigma m_i r_i^2$ (мера инерции); момент количества движения $H = \Sigma m_i V_i r_i$ (мера количества движения).

В формулах, приведенных выше, Σ есть знак суммирования, i — символ, означающий, что данный параметр относится к одной и той же точке, а сама точка выбрана произвольно.

В гироскопической технике момент количества движения принято называть кинетическим моментом и выражать его через характеристики кругового движения, то есть

$$H = \sum m_i V_i r_i = \sum m_i (\omega r_i) \cdot r_i = \omega \sum m_i r_i^2 = I\omega.$$

Таким образом, кинетический момент есть произведение момента инерции тела (относительно оси вращения) на его угловую скорость.

Естественно, законы Ньютона справедливы и для кругового движения. В применении к круговому движению эти законы несколько упрощенно могли бы быть сформулированы так.

Первый закон: вращающееся тело стремится сохранить относительно абсолютного пространства величину и

направление своего момента количества движения (т. е. величину и направление своего кинетического момента).

Второй закон: изменение во времени момента количества движения (кинетического момента) равно приложенному моменту сил.

Третий закон: момент действия равен моменту противодействия.

«Врожденная сила материи»

С тех пор как у водителей общественного транспорта появился микрофон, пассажиры порой слышат полезные напоминания вроде такого: «Товарищи пассажиры! Проходите в середину автобуса сами, не вынуждайте водителя резко тормозить!» И пассажиры, до этого толпившиеся у входа, начинают проходить, ибо ясно представляют себе последствия резкого торможения — сами пассажиры и плохо укрепленный багаж начнут принудительно двигаться внутри автобуса вперед иногда с нежелательными последствиями.

Спрашивается, что является причиной этого движения? Под влиянием авторитета Ньютона, утверждавшего, что движение может вызываться только силами, очень хочется ответить — силы! Но какие это силы? Ведь физические (Ньютоновы) силы торможением или ускорением поезда или автобуса не порождаются. Значит, это должны быть не физические силы, а силы какой-то совершенно иной природы. В механике этим силам дали специальное название — силы инерции и с успехом начали использовать в расчетах механизмов и машин, всегда получая верные, подтверждаемые практикой результаты. Однако тот факт, что силы инерции — силы не физические, что любое движение тел может быть объяснено без их введения, дает основание утверждать, что сил инерции вообще в природе не существует, они фиктивны, порождены не природой, а мышлением ученых.

Однако использование этой категории сил в большинстве случаев значительно упрощает решение задач механики. Вот что пишет, например, о силах инерции академик А. Ю. Ишлинский: «При торможении железнодорожной платформы плохо укрепленный предмет на-

чинает движение по отношению к ней не потому, что на него начинает действовать сила инерции переносного движения. С точки зрения классической механики, он просто стремится продолжать то же движение, что и до торможения, удерживаемый в какой-то степени силами, развиваемыми креплением к платформе. Однако первая трактовка нагляднее. Надо лишь точно оговорить, что платформа принимается условно за неподвижную, и вследствие этого надлежит ввести как бы физические («квазиньютоновы») силы, равные переносным силам инерции. И тогда все становится ясным и верным».

Итак, первая трактовка: силы инерции действуют и вызывают относительное движение тел нагляднее, а получаемые с ее помощью результаты — ясные и верные. Поскольку доступность и наглядность изложния имеют для нас решающее значение, то этой трактовки сил инерции мы будем придерживаться и в дальнейшем. Вспомним еще, что сила инерции равна произведению массы точки (или тела) на ее (или его) ускорение, направлена в сторону, противоположную ускорению, и приложена к соприкасающимся точкам (телам).

А теперь рассмотрим один из самых сложных случаев движения и найдем возникающие при этом силы инерции. Предположим, что материальное тело участвует сразу в двух движениях, одно из которых — переносное— должно быть обязательно круговым, а другое — относительное — может быть либо круговым, либо прямолинейным. Примеров такого движения в природе и технике много: перемещение по поверхности вращающейся Земли пешехода, автомобиля, корабля, движение точек колеса какого-либо экипажа при разворотах последнего и наконец движение волчков и гироскопов.

В механике, как и в других науках, при изучении сложных явлений сами явления заменяют их упрощенными моделями. Представим себе артиста, шагающего по ковровой дорожке, проложенной по радиусу вращающейся сцены. Механическая модель движения артиста (рис. 1): стержень с пазом (ковровая дорожка), который может вращаться вокруг оси O, перпендикулярной плоскости рисунка, с угловой скоростью $\omega_п$ (переносная угловая скорость сцены). Вдоль паза перемещается кубик K (артист), имеющий массу m. Поскольку движение сложное, а пояснить его нужно просто и наглядно, то нам следует усилить арсенал наглядных средств и ввести в

рассмотрение векторы.

Силы, ускорения, скорости и зависящие от них величины (количество движения, угловая скорость, момент силы, кинетический момент и т. д.) характеризуются не только величиной, но и направлением. Мы получим полную, ясную и предельно лаконичную информацию о силе, ускорении, скорости и т. д., если изобразим их стрелками. Длина стрелки (в определенном масштабе) соответствует величине, а направление стрелки — направлению силы, ускорения скорости. Вот эти стрелки и называются векторами. С изображением векторами характеристик прямолинейного движения все достаточно просто и ясно. Но как изобразить векторами характеристики кругового движения? Ученые договорились, что вектор, изображающий какую-либо характеристику кругового движения, составляет прямой угол с плоскостью, в которой это круговое движение происходит.

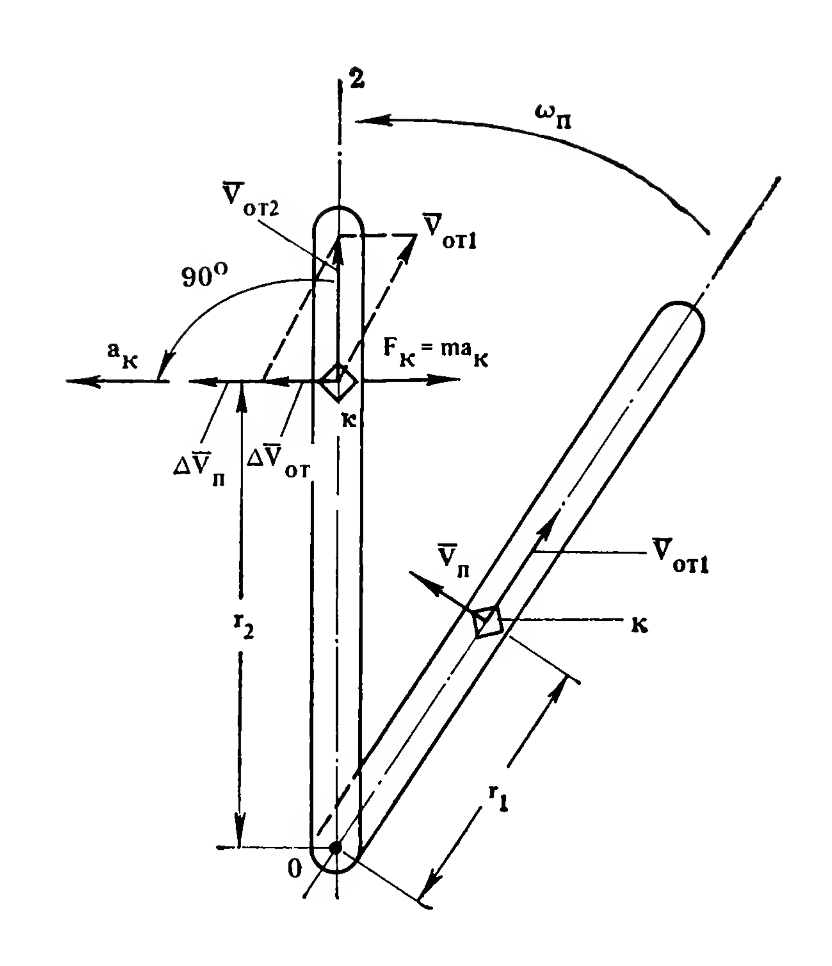


Рис. 1
Схема, поясняющая возникновение кориолисова ускорения

Для примера обратимся к велосипедному колесу и найдем вектор его угловой скорости. Но прежде нужно найти плоскость, в которой происходит круговое движение (вращение) колеса. Очевидно, такой плоскостью будет плоскость спиц колеса. Помните, у Гоголя: «Спицы в колесах смешались в один гладкий круг...» Теперь остается вообразить прямую линию, которая составляла бы прямой угол с этим «гладким кругом». В данном простейшем случае это будет ось вращения колеса. Итак, вектор угловой скорости направлен по оси вращения колеса, но в какую сторону? Ведь у оси два конца... И по этому вопросу ученые пришли к соглашению. Решили: вектор всегда направлен так, чтобы, смотря с его конца, то есть со стороны острия стрелки, видеть круговое движение происходящим против хода часовой стрелки. Вооружившись этим правилом, находим вектор угловой

скорости велосипедного колеса: при движении велосипеда с велосипедистом вперед вектор угловой скорости любого из двух велосипедных колес перпендикулярен плоскости этих колес и направлен в левую от велосипедиста сторону. Над векторами можно производить целый ряд операций. Нам для дальнейшего изложения будут нужны лишь операции сложения и разложения векторов (по правилу параллелограмма), а также операция перенесения вектора из одной точки движущегося тела в другую.

А теперь, получив минимальную информацию о векторах, возвращаемся к нашей модели. Итак, стержень вращается с переносной угловой скоростью $\omega_п$, в результате чего кубик *К*, вращаясь вместе со стержнем, приобретает переносную линейную скорость, вектор которой $\overline{V}_п$ всегда перпендикулярен радиусу вращения *r*. Кроме этого, сам кубик *К* движется по пазу относительно стержня с постоянной по величине относительной линейной скоростью, вектор которой $\overline{V}_{от}$ направлен всегда вдоль радиуса вращения *r*. Физическими силами, вызывающими переносное и относительное движения кубика, пока интересоваться не будем, наша цель другая — найти силы инерции, с которыми кубик действует на стенки паза.

Участвуя в переносном и относительном движениях, кубик движется непрерывно. Мы рассмотрим два мгновения: начальное, обозначенное цифрой 1, и какое-то следующее, обозначенное цифрой 2. Что же изменилось за время Δt, прошедшее между этими мгновениями? Внимательное изучение рисунка показывает, что в результате переносного вращения изменились направление вектора относительной скорости (было $\overline{V}_{от1}$, стало $\overline{V}_{от2}$) и величина линейной переносной скорости (было $V_{п1}=$ $=\omega r_1$, стало $V_{п2}=\omega r_2$; r_2 стал больше, чем r_1, из-за относительного движения кубика).

Итак, за время Δt изменились и переносная и относительная скорости кубика, а это, как мы уже знаем, является верным признаком того, что кубик движется с ускорением.

Простые геометрические построения, приведенные на рис. *1* (позиция 2), показывают, что векторы изменений и относительной, $\Delta\overline{V}_{от}$, и переносной, $\Delta\overline{V}_п$, линейных скоростей кубика направлены по линии, перпендикуляр-

ной радиусу вращения r_2. Стало быть, и линейное ускорение кубика $a_К$, порожденное взаимным влиянием переносного движения на относительное и относительного на переносное, направлено вдоль этой линии. Поскольку кубик движется с ускорением $a_К$, то он создает силу инерции $F_К = ma_К$, приложенную к стенке паза стержня.

Упоминания об ускорении $a_К$, порождаемом взаимным влиянием переносного и относительного движений, имеются в трудах Л. Эйлера и «короля математиков» К. Гаусса, однако ускорение это было названо **кориолисовым** в честь французского ученого-механика Г. Кориолиса (1792—1843), который начал практически учитывать его при расчетах механизмов и машин.

Направление вектора Кориолисова ускорения определяется по простому правилу: нужно вектор относительной линейной скорости $\overline{V}_{ОТ}$ повернуть в сторону переносного вращения на прямой угол. Мысленно проделав эту операцию на рис. 1, получаем направление вектора Кориолисова ускорения $a_К$.

Кориолисово ускорение и соответствующие ему Кориолисовы силы инерции лежат в основе удивительных свойств вращающихся тел и многих явлений природы.



ОТ ВОЛЧКА ДО ГИРОСКОПА

ГЛАВА 2

Механика — наука о законах движения тел. Замечательной ее особенностью. . . является переход от рассмотрения существа явлений. . . к созданию техники, нередко коренным образом преобразующей условия нашей жизни. Подпрыгивающая крышка кипящего чайника и паровая машина, воздушный змей и аэроплан, фейерверк и баллистическая ракета, волчок и гироскопический компас. . .

А.Ю. Ишлинский

Упрощенное объяснение движения волчка. Знакомство с основными гироскопическими терминами — кинетический момент, прецессия, гироскопический момент. Постановка и решение задачи о вращении тела вокруг одной неподвижной точки — начало разработки теории гироскопических явлений. Большой волчок — планета Земля. Леон Фуко, рождение гироскопа

Почему волчок не падает

Небольшая вершина, которую мы покорили, прочитав и усвоив предыдущую главу, позволяет нам ответить на вопрос, вынесенный в заголовок.

Представим себе какой-либо волчок, например тот, что описан в начале книги, — тонкий латунный диск (шестеренка), насаженный на тонкую стальную ось. Этот вариант волчка изображен на рис. 2.

Пусть вас не пугает сложность рисунка, она кажущаяся. Ведь сложное — всего лишь недостаточно понятое. Некоторые усилия и внимание — и все станет простым и ясным.

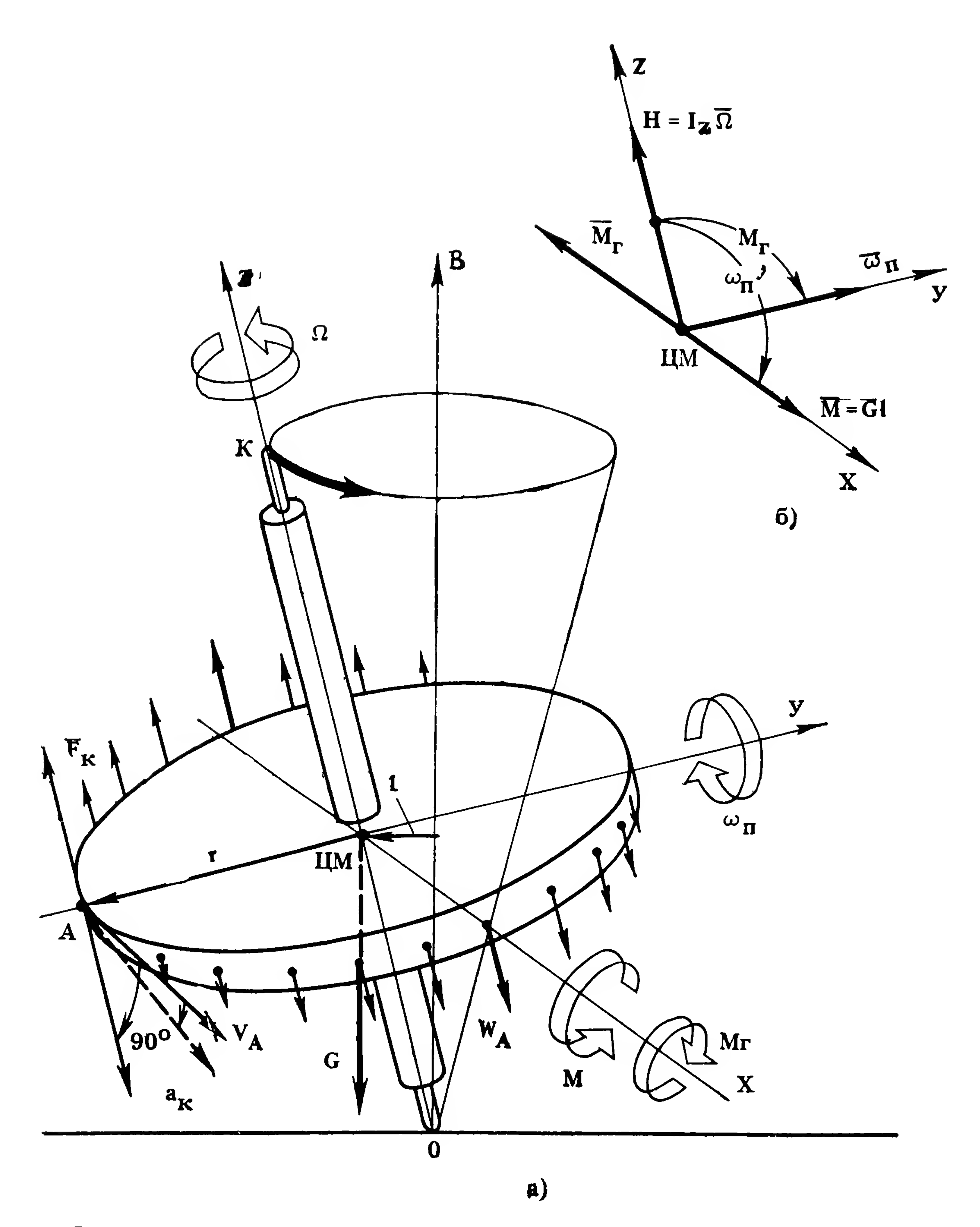


Рис. 2.
Схема, поясняющая возникновение прецессии, гироскопического момента и характера движения волчка

Возьмем прямоугольную систему координат *xyz* и поместим ее центр в центр масс волчка, то есть в точку *ЦМ*. Пусть ось *z* проходит через ось собственного быстрого вращения волчка, тогда оси *x* и *y* будут параллельны плоскости диска и лежать внутри него. Договоримся, что оси *xyz* участвуют во всех движениях волчка, кроме его собственного быстрого вращения.

В правом верхнем углу (рис. 2, *б*) изобразим такую

же систему координат *xyz*. Она нам понадобится в дальнейшем для разговора на «языке» векторов.

Сначала не будем раскручивать волчок, а попытаемся его поставить нижним концом оси на опорную плоскость, например на поверхность стола. Результат не обманет наших ожиданий: волчок обязательно упадет на бок. Почему это происходит? Центр масс волчка (точка *ЦМ*) лежит выше точки его опоры (точки *O*). Сила веса *G* волчка, как мы уже знаем, приложена в точке *ЦМ*. Поэтому любое малое отклонение оси *z* волчка от вертикали В обусловит появление плеча *l* силы *G* относительно точки опоры *O*, то есть появление момента *M*, который и повалит волчок в направлении своего действия, то есть вокруг оси *x*.

Теперь раскрутим волчок вокруг оси *z* до большой угловой скорости Ω. Пусть по-прежнему ось *z* волчка отклонена от вертикали В на малый угол, т. е. на волчок действует тот же момент *M*. Что же изменилось теперь? Как мы увидим дальше, изменилось многое, а вот в основе этих изменений лежит тот факт, что теперь каждая материальная точка *i* диска уже имеет линейную скорость V_i, обусловленную вращением диска с угловой скоростью Ω.

Выделим одну точку в диске, например точку А, имеющую массу m_A и лежащую в средней плоскости диска на расстоянии *r* от оси вращения (*r* — радиус диска). Рассмотрим особенности ее движения за один оборот.

Итак, в начальный момент времени точка *A*, как и все другие точки диска, имеет линейную скорость, вектор которой V_A лежит в плоскости диска. На волчок (и его диск) действует момент *M*, который пытается опрокинуть волчок, придав точкам диска линейные скорости, векторы которых W_i перпендикулярны плоскости диска.

Под действием момента *M* точка *A* начинает приобретать скорость W_A. В силу закона инерции скорость материальной точки мгновенно нарасти никак не может. Поэтому в начальном положении (точка *A* находится на оси *y*) ее скорость $W_A = 0$, и только через четверть оборота диска (когда точка *A*, вращаясь, будет уже находиться на оси *x*) ее скорость W_A возрастает и станет максимальной. Это значит, что под действием момента *M* вращающийся волчок поворачивается вокруг оси *y*, а не вокруг оси *x* (как это было с нераскрученным волчком). В этом явлении начало разгадки тайны волчка.

Поворот волчка под действием момента M называется прецессией, а угловая скорость поворота — скоростью прецессии, обозначим ее $\omega_п$. Прецессируя, волчок начал поворот вокруг оси y. Это движение является переносным по отношению к собственному (относительному) вращению волчка с большой угловой скоростью Ω. В результате переносного движения вектор относительной линейной скорости V_A материальной точки A, уже возвратившейся в начальное положение, окажется повернутым в сторону переносного вращения.

Таким образом, возникает уже знакомая нам картина влияния переносного движения на относительное, влияния, рождающего Кориолисово ускорение. Направление вектора Кориолисова ускорения точки A (в соответствии с правилом, приведенным в предыдущей главе), найдем, повернув вектор относительной скорости V_A точки A на 90° в сторону переносного (прецессионного) вращения волчка. Кориолисово ускорение $a_к$ точки A, имеющей массу m_A, порождает силу инерции F_K, которая направлена противоположно вектору ускорения a_K и приложена к материальным точкам диска, соприкасающимся с точкой A.

Рассуждая подобным образом, можно получить направления векторов Кориолисова ускорения и силы инерции для любой другой материальной точки диска.

Вернемся к точке A. Сила инерции F_K на плече r создает момент $M_{ГA}$, действующий на волчок вокруг оси x. Этот момент, порожденный Кориолисовой силой инерции, называется гироскопическим. Его величину определяют с помощью формулы:

$$M_{ГA} = rF_K = m_A r^2 \Omega \omega_П = I_A \Omega \omega_П.$$

Величину $I_A = m_A r^2$, зависящую от массы точки и ее расстояния от оси вращения, называют осевым моментом инерции точки. Момент инерции точки является мерой ее инертности во вращательном движении. Понятие момента инерции было введено в механику Л. Эйлером.

Моментами инерции обладают не только отдельные точки, но и целые тела, поскольку они состоят из отдельных материальных точек. Имея это в виду, составим формулу для гироскопического момента $M_Г$, создаваемого диском волчка. Для этого в предыдущей формуле заменим момент инерции точки I_A на момент инерции диска $I_Д$, а угловые скорости Ω и $\omega_п$ оставим прежни-

ми, так как все точки диска (за исключением тех, что лежат соответственно на осях z и y) вращаются с одинаковыми угловыми скоростями Ω и $\omega_п$. Поэтому

$$M_г = I_д\Omega\omega_п = H\omega_п, \text{ где } H = I_д\Omega —$$

кинетический момент волчка, точнее, его диска.

Гироскопический момент, создаваемый диском, уравновешивает момент силы тяжести, и поэтому не допускает падения волчка (поворота вокруг оси x), то есть

$$M = M_г = H\omega_п,$$

а отсюда следует очень важный результат:

$$\omega_п = \frac{M}{H},$$

то есть, зная величину кинетического момента H и величину момента физических сил M, можно определить величину угловой скорости прецессии $\omega_п$.

Н. Е. Жуковский — «отец русской авиации», занимавшийся также изучением механики волчков и гироскопов, сформулировал следующее простое правило для определения направления гироскопического момента (рис. 2, *б*): **гироскопический момент стремится совместить вектор кинетического момента H с вектором угловой скорости переносного вращения $\omega_п$ по кратчайшему пути.**

В частном случае скоростью переносного вращения является скорость прецессии.

На практике пользуются также аналогичным правилом для определения направления прецессии: **прецессия стремится совместить вектор кинетического момента H с вектором момента физических сил M по кратчайшему пути.**

Эти простые правила лежат в основе гироскопических явлений, и мы ими будем широко пользоваться в дальнейшем.

Но вернемся к волчку. Почему он не падает, поворачиваясь вокруг оси x, ясно — препятствует гироскопический момент. Но может быть, он упадет, поворачиваясь вокруг оси y в результате прецессии? Тоже нет! Дело в том, что, прецессируя, волчок начинает поворачиваться вокруг оси y, а это значит, что сила веса G начинает создавать момент, действующий на волчок вокруг этой же оси. Такая картина нам уже знакома, с нее мы начина-

ли рассмотрение поведения вращающегося волчка. Стало быть, и в этом случае возникнут процессия и гироскопический момент, которые не позволят волчку долго наклоняться вокруг оси y, а переведут движение волчка в другую плоскость, в которой все явления повторятся снова.

Таким образом, пока угловая скорость собственного вращения волчка Ω велика, момент силы тяжести вызывает прецессию и гироскопический момент, которые удерживают волчок от падения в каком-либо одном направлении. Этим объясняется устойчивость оси z вращения волчка. Допуская некоторые упрощения, можно считать, что конец оси волчка, точка K движется по окружности а сама ось вращения z описывает в пространстве конические поверхности с вершинами в точке O.

Вращающийся волчок представляет собой пример движения тела, имеющего одну неподвижную точку (у волчка это точка O). Задача о характере движения такого тела сыграла важную роль в развитии науки и техники, ее решению посвятили свои труды многие выдающиеся ученые.

«Ускользающая русалка»

Так знаменитый немецкий математик Карл Вейерштрасс называл задачу о вращении твердого тела вокруг одной неподвижной точки и отговаривал свою ученицу Софью Васильевну Ковалевскую (1850—1891) заниматься ею. Однако «самая умная и обаятельная женщина Европы» (по словам Ф Нансена) не послушалась своего старого учителя и занялась этой, по ее словам, «дьявольской головоломкой». Но расскажем все по порядку.

В 1727 г., в год смерти Ньютона, в Петербургской Академии наук появился двадцатилетний Леонард Эйлер.

Швейцарец, выпускник университета в Базеле, он связал свою судьбу с Россией, прожил в Петербурге свои лучшие годы и там, на Смоленском кладбище, был похоронен. В Петербурге расцвел и возмужал гений Эйлера, гений, обогативший математику и механику множеством фундаментальных открытий, носящих его имя. Сре-

ди оставленных потомству 850 научных работ Эйлера жемчужиной сверкает учение о вращении тела вокруг одной неподвижной точки. Использовав ньютоновскую абсолютную и введя в рассмотрение подвижную (связанную с вращающимся телом) системы прямоугольных координат и углы рассогласования между их осями (углы Эйлера), Эйлер составил общие математические уравнения (уравнения Эйлера), характеризующие движение твердого тела вокруг одной неподвижной точки. Эти уравнения являются исходными для изучения всех возможных случаев движения твердого тела вокруг неподвижной точки. Общие уравнения сложны, решить их непросто. Сам Эйлер в 1758 г. нашел решение своих уравнений лишь для частного случая, когда центр масс тела совпадает с неподвижной точкой, а момент всех сил, приложенных к телу, равен нулю. Оказалось, что вращающееся тело, удовлетворяющее этим условиям, обладает замечательным свойством: одна из его осей, а именно та, по которой направлен вектор момента количества движения, сохраняет неизменным свое направление относительно абсолютного пространства. В большинстве технических устройств, использующих быстровращающиеся тела, направления векторов момента количества движения и угловой скорости собственного вращения тела отличается лишь на очень малые углы.

Однако направление вектора момента количества движения обычно не имеет материального воплощения, а направление вектора угловой скорости собственного вращения тела имеет, например, в виде вала маховика.

Если в целях наглядности дальнейшего изложения пренебречь малыми углами (что обычно делается на практике), то можно считать, что именно продольная ось вала маховика сохраняет неизменное направление в абсолютном пространстве. Нужно помнить, что планета Земля движется относительно абсолютного пространства. Следовательно, вращающееся тело, удовлетворяющее условиям Эйлера, сохраняя неизменное положение оси своего вращения относительно абсолютного пространства, относительно поверхности Земли будет иметь кажущееся движение.

Через 30 лет после Эйлера, в 1788 г., выдающийся французский ученый-механик Ж. Лагранж (1736—1813) нашел решение уравнений Эйлера еще для одного частного случая движения тела вокруг неподвижной точки.

Условия, накладываемые на вращающееся тело в случае, рассматриваемом Лагранжем, были менее жесткими, чем в случае Эйлера: тело предполагалось симметричным относительно оси собственного вращения, центр масс тела лежал на этой оси, но не совпадал с неподвижной точкой, движение тела рассматривалось в поле сил равномерного тяготения (классический волчок). В этом случае ось собственного вращения тела уже не сохраняла неизменным свое положение в абсолютном пространстве, а совершала сложное движение. После Эйлера и Лагранжа исследование проблемы вращения тела вокруг неподвижной точки ввиду исключительной сложности длительное время не получало дальнейшего развития. Проблема имела не только теоретическое, но и важное практическое значение. Ее более полного решения ждали астрономы, изучавшие движение громадных волчков-планет, оружейники, давно заметившие, что пули и снаряды точнее попадают в цель, если придать им, кроме поступательного, еще и вращательное движение, моряки и техники, пытавшиеся использовать замечательные свойства волчка для определения курса и получения горизонтальных площадок на качающихся палубах кораблей, а также люди многих других специальностей.

Ввиду важности проблемы французская академия наук назначила премии за какое-либо существенное продвижение в решении этой задачи. Два проведенных конкурса не дали результатов. В 1888 г. конкурс был объявлен в третий раз. Из пятнадцати представленных работ премию получила работа русского математика, профессора Стокгольмского университета Софьи Васильевны Ковалевской. Конкурсная комиссия, в состав которой входили крупнейшие ученые, высоко оценила работу С. В. Ковалевской, дав о ней лестный отзыв и увеличив премию с 3000 до 5000 франков.

Случай, рассмотренный Ковалевской, учитывал тот широко распространенный на практике факт, что центр масс вращающегося тела не лежит на оси собственного вращения и на тело действует сила тяжести.

В 1896 г. Н. Е. Жуковский построил на примере волчков наглядные модели для всех трех решенных в конечном виде случаев вращения твердого тела вокруг неподвижной точки. На рис. 3 представлены модели Н. Е. Жуковского.

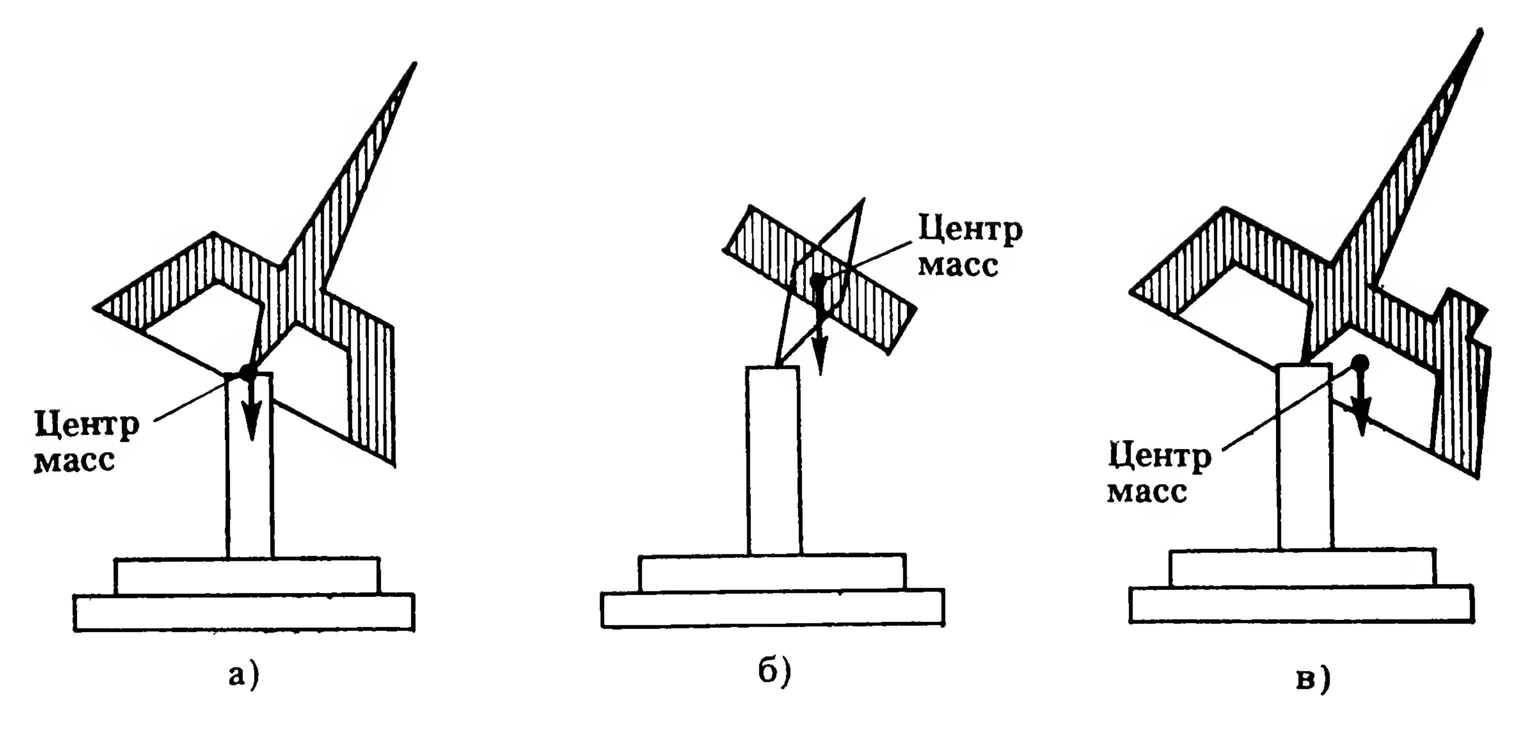


Рис. 3.
Модели вращающихся тел, имеющих одну неподвижную точку, предложенные Н. Е. Жуковским: а — случай Л. Эйлера; б — случай Ж. Лангранжа; в — случай С. В. Ковалевской (ЦМ — центр масс).

Работы Ковалевской стали исходным пунктом многочисленных исследований русских и зарубежных ученых по теории вращения твердого тела.

Голубая планета Земля

Звездное небо всегда привлекало людей. Еще в глубокой древности было замечено, что каждая звезда периодически повторяет свой путь на ночном небе.

Это наводило древних ученых на мысль, что в мире что-то вращается — либо Земля относительно неподвижного звездного неба, либо наоборот. Вопрос запутался совсем, когда греческий астроном Гиппарх, живший во II в. до н. э., обнаружил, что некоторые звезды появляются в расчетных точках небесной сферы несколько раньше, чем они появлялись 150 лет назад, о чем свидетельствовали труды его предшественников, греческих астрономов Тимохариса и Аристилла. Уверенный в своих расчетах и не смея усомниться в достоверности результатов своих предшественников, Гиппарх сделал вывод, что звезды достаточно медленно, но все-таки меняют видимое с Земли положение на небесной сфере, сходят со своих круговых путей. Это явление получило название прецессии, что означает «иду впереди», «предшествую». Позже, когда Ньютон объяснил явление прецессии Земли, этот термин

стал применяться для обозначения специфического движения волчков и гироскопов.

Через 300 лет после Гиппарха вопрос о том, что вращается: Земля или небо, получил определенность. Выдающийся древнегреческий ученый, астроном, географ и картограф Клавдий Птолемей (II в. н. э.) сумел убедить всех — Земля неподвижна, вращаются Солнце и небо. Началось тысячелетнее владычество ошибочной геоцентрической системы мира, которая не могла объяснить прецессии Земли и многих других явлений, но с этим мирились.

Однако Птолемей не только ошибался. Почти правильным было его мнение по другому спорному тогда вопросу — о форме Земли. В противоположность многим фантастическим представлениям о форме Земли, существовавшим в древние времена, Птолемей считал, что Земля имеет форму шара.

Однако форма Земли — не совсем шар, и это, «опираясь на плечи гигантов», доказал Ньютон.

На постаменте памятника одному из «гигантов» — Николаю Копернику высечено: «Остановивший Солнце, двинувший Землю». Полна драматизма борьба за признание гелиоцентрической системы мира — погиб в пылающем костре Джордано Бруно, унижен судом инквизиции престарелый Галилей, но «...все-таки она вертится!»

Да, Земля движется в абсолютном пространстве, и этому найдено множество доказательств. В настоящее время твердо установлено, что Земля вращается вокруг своей оси с запада на восток со скоростью один оборот в сутки (примерно 15°/ч), вращается вокруг Солнца со скоростью один оборот в год (примерно 0,04°/ч), прецессирует, совершает нутационные колебания и спиралевидное движение в пределах Галактики.

Но вернемся к прецессии... Новаторские идеи Ньютона, безоговорочно принятые в Англии, не нашли поддержки среди значительной и влиятельной части ученых континентальной Европы. Центром антиньютоновского движения почти до середины XVIII в. была Парижская академия наук. Знаменитый Вольтер, побывавший в Англии и ставший здесь на сторону ньютонианцев, в своих популярных «Началах ньютоновской философии» писал: «В Париже вселенную видят наполненной эфирными вихрями; здесь же в том же мировом пространстве ведут

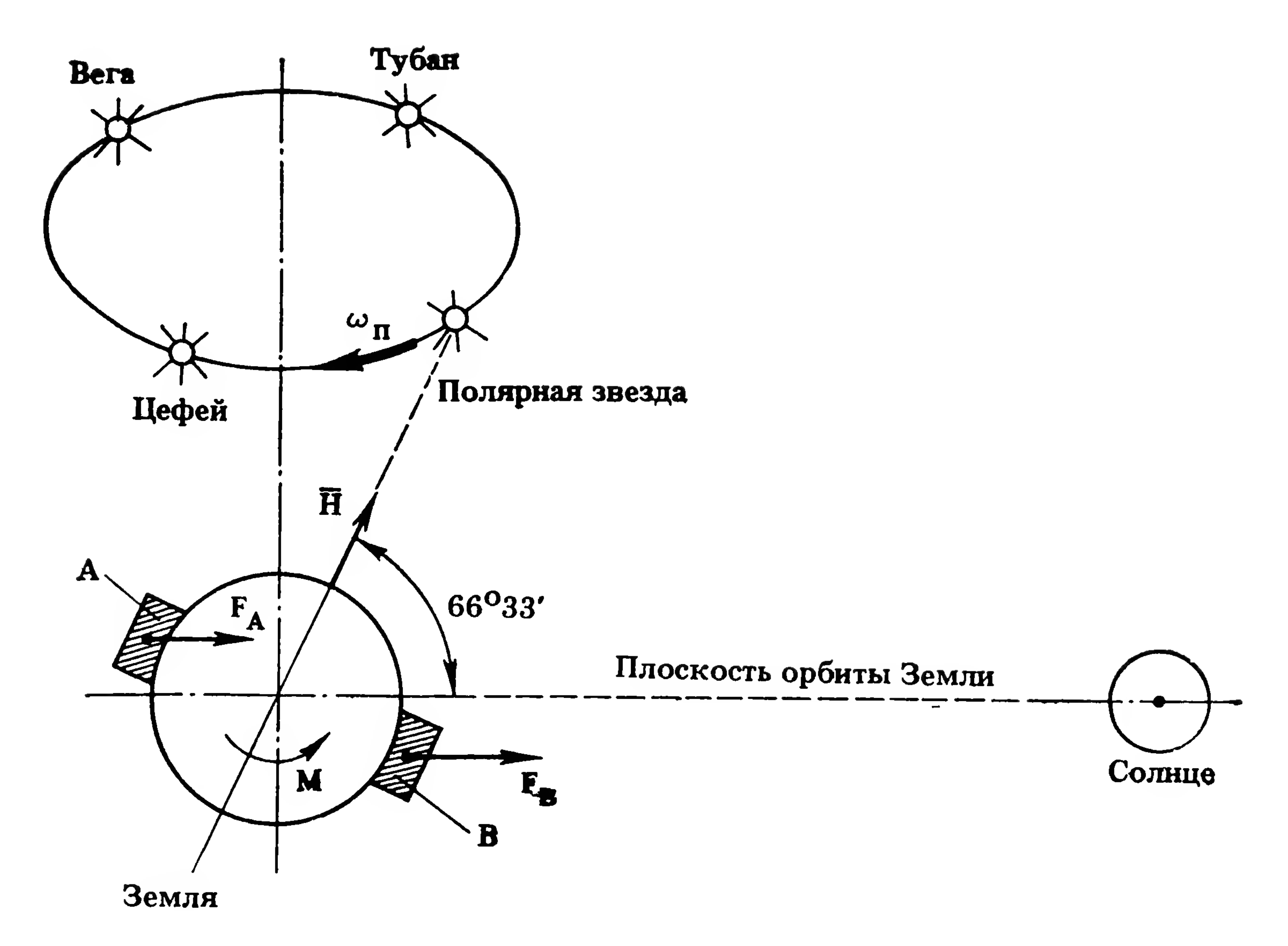


Рис. 4.
Схема, поясняющая прецессию Земли

свою игру невидимые силы. В Париже приливы и отливы морей вызываются давлением Луны, в Англии, напротив, моря тяготеют к Луне... Наконец в Париже Землю изображают удлиненной у полюсов, подобно яйцу, в Лондоне же, напротив, Земля уплощена, как дыня».

Ньютон оказался прав. Точные измерения, проведенные позднее, показали, что Земля — не идеальный шар, а тело вращения, сжатое в направлении оси полюсов. Оказалось, что экваториальный радиус Земли равен 6378 км, а полярный — 6357 км, то есть на 21 км меньше.

Чтобы объяснить явление прецессии Земли, Ньютон представил действительную форму Земли как идеальный шар с массивным поясом на экваторе толщиной 21 км, на отдельные участки которого действуют разные по величине открытые им силы тяготения. В частности, он рассматривал силы тяготения между Солнцем и участками пояса, а также между Луной и участками пояса. Проследим за рассуждениями Ньютона, рассматривая для примера только силы притяжения Солнца. На рис. 4 изображена модель Земли, предложенная Ньютоном.

Известно, что ось суточного вращения Земли наклонена к плоскости орбиты годового вращения Земли на

угол 66°33′. В результате этого одна часть (А) массивного экваториального пояса оказывается над плоскостью орбиты, а другая часть (*B*) — под плоскостью орбиты На обе эти части действуют силы притяжения Солнца F_A и F_B. Так как часть пояса *B* расположена ближе к Солнцу, чем часть А, то согласно закону тяготения Ньютона, сила F_B будет больше силы F_A. Линии действия сил F_A и F_B не проходят через центр масс шаровой части Земли, поэтому обе силы создают встречно направленные моменты, действующие вокруг одной из осей, лежащей в экваториальной плоскости Земли. Поскольку сила F_B больше силы F_A, а плечи их равны, то и создаваемый ею момент больше; следовательно, результирующий момент сил F_A и F_B будет направлен так же, как и момент силы F_B. Если считать, что векторы сил F_A и F_B лежат в плоскости рисунка, то вектор результирующего момента *M* в соответствии с ранее принятыми правилами будет составлять прямой угол с этой плоскостью и направлен на нас. Вся черновая работа сделана, начинаем собирать плоды... Используем наши гироскопические знания Итак, перед нами гигантский волчок — планета Земля имеющий кинетический момент *H*. К этому гигантскому волчку приложен результирующий момент сил тяготения *M*.

Следовательно, волчок-шар начнет прецессировать, пытаясь совместить по кратчайшему пути вектор *H* с вектором *M*. Аналогичное движение Земли вызовут и силы притяжения Луны. Так как в процессе вращения вокруг Солнца и Земля и Луна непрерывно изменяют свое положение в мировом пространстве, то, естественно, будет непрерывно изменяться в пространстве и направление вектора момента $M_{лс}$ (действующих на земной шар сил притяжения Луны и Солнца). В результате этого земная ось совершает в пространстве сложное движение, которое приближенно можно представить как конусообразное, происходящее вокруг оси годового вращения Земли. Угловая скорость прецессии Земли определяется путем деления величины возмущающего момента сил тяготения $M_{лс}$ на величину кинетического момента Земли *H*.

Вычисления показали, что, прецессируя, Земля совершает один оборот за 25 800 лет, или скорость прецессии составляет около 50 угловых секунд в год. Оказывается это не так мало. Например, через каждые 72 года угол

между осью вращения Земли и направлением на Полярную звезду возрастает на 1°. В 7500 г. ось вращения Земли будет направлена на одну из звезд созвездия Цефей, а в 14000 г. Полярной звездой станет Вега (рис. 4). О всех интересных явлениях, вызванных вращением Земли, нет возможности рассказать в этой книге, поэтому читателям предлагаются несложные задачи для самостоятельного решения. Во всем мире знают нашу песню «Катюша». А нельзя ли из строчек:

Выходила на берег Катюша,
На высокий берег, на крутой

определить, по какому берегу реки — левому или правому — гуляла Катюша?

Еще в прошлом веке начались споры о том, бывали ли в экваториальных зонах Американского континента европейцы или африканцы до походов Колумба. И Атлантический океан с его ветрами и течениями — преграда или, наоборот, гигантская «транспортерная» лента между Старым и Новым Светом? Ответить на эти вопросы будет проще, если указать, в каком направлении в экваториальных зонах Атлантического океана дуют постоянные ветры (пассаты) и текут воды океана.

Если не упускать из виду, что Земля вращается, и вспомнить о кориолисовых ускорениях и силах инерции, то на подобные вопросы нетрудно дать правильные ответы.

Но вернемся к вопросу о форме Земли. Действительная форма Земли сложна, и это порождает множество тонких эффектов, которые исследуют и учитывают в практической деятельности специалисты. Для наших целей вполне допустимо считать Землю идеальным шаром. Будем также приближенно считать, что направление силы тяжести (направление отвесной линии) совпадает с направлением к центру шарообразной Земли, то есть с радиусом Земли.

Направление отвесной линии (радиуса Земли) будем называть вертикалью, а плоскость, перпендикулярную ей, горизонтальной плоскостью.

Таким образом, в каждой точке поверхности Земли имеется свое направление вертикали и своя горизонтальная плоскость (рис. 5).

Еще древние греки предложили очень удобную систему указания положения любой точки на поверхности

шарообразной Земли. Они мысленно проводили радиус в выбранную точку на поверхности Земли (например, в точку A) и характеризовали положение этого радиуса двумя угловыми координатами φ и λ, которые стали называться широтой и долготой. За начало отсчета широты принималась плоскость, перпендикулярная к прямой, соединяющей полюса Земли — северный N и южный S и делившей земной шар на две равные половины — северную и южную. Линия пересечения этой плоскости с поверхностью Земли стала называться экватором, что в переводе на русский язык значит «делитель». Любые другие плоскости, параллельные плоскости экватора, дают при пересечении с поверхностью Земли окружности, которые называются параллелями.

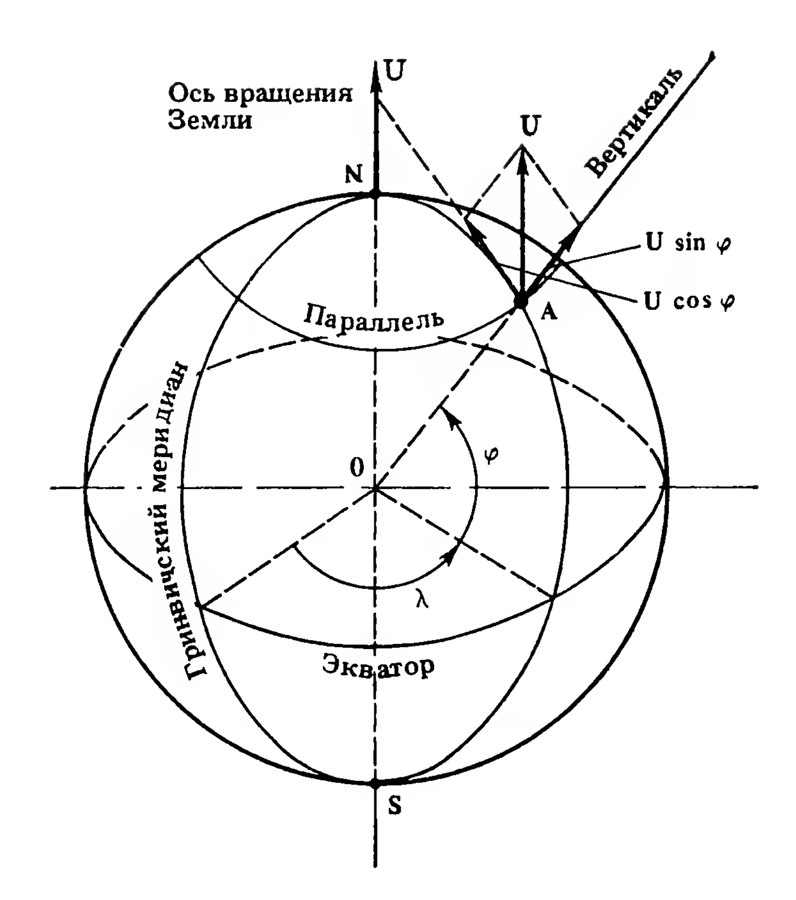


Рис. 5. Шарообразная модель вращающейся Земли

За начало отсчета долготы принималась одна из плоскостей, которая проходила через линию NS, соединявшую полосы. Таких плоскостей можно провести много, и все они будут равноправны; пересекаясь с поверхностью Земли, эти плоскости дадут окружности, которые называются меридианами. Все меридианы, постепенно сближаясь, пересекаются на полюсах Земли.

Птолемей считал, что начальный меридиан следует провести через самую западную точку суши, известную древним грекам. Такой точкой была западная оконечность острова Ферро в группе Канарских островов. Узаконить это предложение пытались на конгрессе математиков и астрономов в 1636 г. Однако из этого ничего не получилось. Каждая морская держава хотела иметь свой начальный меридиан. Англия вела отсчет долготы от меридиана, проходившего через Гринвич, Россия считала начальным Пулковский меридиан, Франция — Парижский. Лишь в 1884 г. морские державы пришли к согла-

шению, с тех пор отсчет долготы ведется от Гринвича. Гринвичский меридиан разделил земной шар на Западное и Восточное полушария.

А теперь рассмотрим движение в абсолютном пространстве маленькой горизонтальной площадки, находящейся на поверхности Земли, например пола вашей комнаты. Обозначим эту площадку на рис. 5 буквой A, ее координатами будут широта φ и долгота λ. Перенесем в точку A вектор угловой скорости вращения Земли $\bar{U}$ и разложим его в плоскости меридиана на две составляющие, одна из которых — $\bar{U}\sin\varphi$ — будет направлена по вертикали (по радиусу Земли), а вторая — $\bar{U}\cos\varphi$ — будет лежать в горизонтальной плоскости и направлена вдоль меридиана к северному полюсу Земли.

Угловые скорости $U\sin\varphi$ и $U\cos\varphi$ называются соответственно вертикальной и горизонтальной составляющей скорости вращения Земли.

Получен важный результат, который в дальнейшем будет использоваться при рассмотрении работы большинства гироскопических приборов и систем. Результат этот может быть сформулирован так: любая малая горизонтальная площадка, расположенная на поверхности Земли, одновременно участвует в двух движениях — вращается вокруг вертикали со скоростью $U\sin\varphi$ и вращается вокруг направления меридиана со скоростью $U\cos\varphi$.

Рождение гироскопа

Получив медицинское образование, Жан Бернар Леон Фуко (1819—1868) увлекся экспериментальной физикой и достиг в этой области немалых успехов. Назовем лишь самые крупные — токи Фуко, маятник Фуко, гироскопы.

Слово «гироскоп», придуманное Л. Фуко, состоит из двух греческих слов: «гирос» — вращение и «скопео» — наблюдать, смотреть.

Итак, гироскоп — это «наблюдатель вращения». Сейчас гироскопы «наблюдают» вращение самых разнообразных объектов — кораблей, самолетов, ракет, спутников и многих других. Л. Фуко, создавая свой лабораторный прибор (гироскоп), хотел с его помощью наблюдать вращение Земли относительно абсолютного пространства.

Идея прибора основывалась на теоретическом поло-

жении Л. Эйлера о том, что быстровращающееся тело, имеющее одну неподвижную точку и не подверженное действию моментов внешних сил, сохраняет неизменным положение оси своего вращения в абсолютном пространстве. Л. Фуко рассуждал примерно так. Поскольку Земля вращается в абсолютном пространстве, то должно наблюдаться движение предметов, расположенных на ее поверхности, по отношению к оси такого быстровращающегося тела.

Приступая к созданию своего прибора, Л. Фуко сразу же столкнулся с тремя взаимосвязанными проблемами, ставшими потом классическими в гироскопической технике:

1) как практически реализовать тело, имеющее одну неподвижную точку и, стало быть, свободу вращения вокруг трех взаимно перпендикулярных осей;

2) как раскрутить это тело вокруг одной из его осей и в дальнейшем поддерживать высокое значение угловой скорости;

3) как «защитить» вращающееся тело от действия внешних возмущающих моментов.

В качестве тела, предназначенного для быстрого вращения, Л. Фуко выбрал **маховик**, который был установлен в **кардановом подвесе.**

Прежде чем объяснить, как устроен карданов подвес, широко применяющийся в технике и в наше время, стоит сказать несколько слов о человеке, чье имя он носит.

Джероламо Кардано (1501—1576) — итальянский философ, врач, математик и техник — легендарная личность. Хилый и болезненный от рождения, он был могуч духом и очень хотел прославиться. Обладал выдающимися способностями и редким трудолюбием; жил активно — участвовал в научных диспутах, рьяно занимался медициной и физкультурой, азартно играл в шахматы и кости, много писал, работал с наслаждением. В своей книге «О моей жизни...» Д. Кардано, подводя итог сделанному, написал: «Число разрешенных мною проблем и вопросов доходит до 40 тысяч; и более мелких указаний я оставляю после себя до 200 тысяч. Вот основания, почему светоч нашей отчизны (Андреа Альчиати — видный юрист начала XVI в. — *Ред.*) назвал меня «мужем открытий». Однако этот «муж открытий» был не очень щепетилен в вопросах приоритета, и многие истины, известные и до него (сознательно или искренне заблуждаясь,

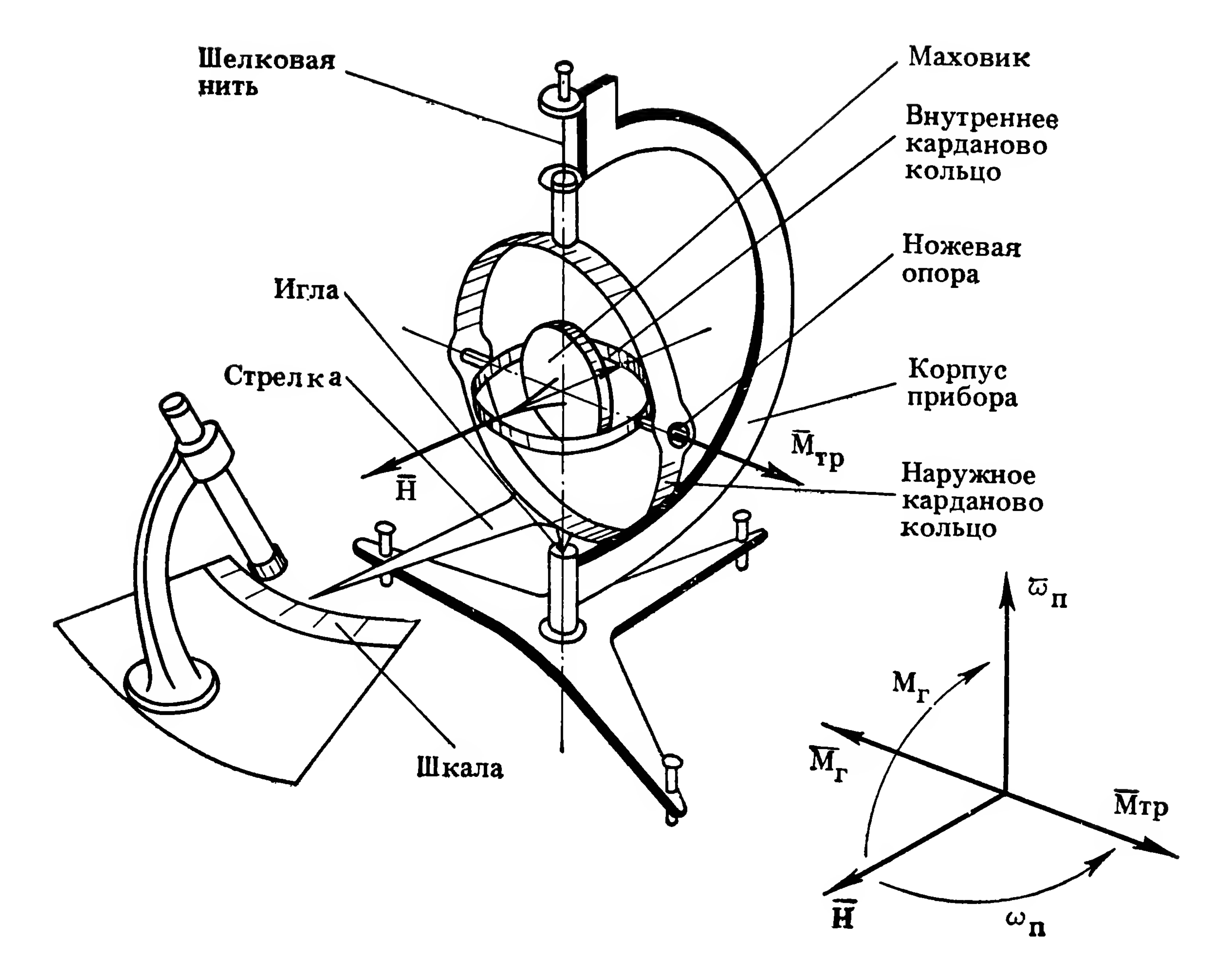


Рис. 6.
Схема модели первого гироскопа Л. Фуко, 1852 г.

теперь не установить), публиковал под своим именем. В частности, это относится и к карданову подвесу, который еще в XIII в. был описан французским архитектором Уйларсом де Гонкуром.

В настоящее время разработано много кинематических схем карданова подвеса, широко применяемых в гироскопической технике. Однако мы вернемся к тому варианту, который применил в своем приборе Л. Фуко (рис. 6). Ось вращения маховика на подшипниках была установлена в кольце, полуоси которого были выполнены в виде трехгранных призм («ножей»). Ось вращения ножевых опор составляла прямой угол с осью вращения маховика. Стальные полированные «подушки», на которые опирались грани ножей, были установлены в другом кольце. Это кольцо сверху с помощью шелковой нити подвешивалось к корпусу прибора, а снизу упиралось в корпус иглой. Для наблюдения за движением оси вращения маховика относительно поверхности Земли на кольце была укреплена длинная стрелка (поверхность

Земли в данном приборе представляла подставка прибора со шкалой). Кольца называются соответственно внутренним и наружным кардановыми кольцами. Эти два кольца вместе с установленными на них опорами образуют механическую систему, называемую кардановым подвесом. Карданов подвес позволяет установленному в нем телу одновременно поворачиваться вокруг трех взаимно перпендикулярных осей (обеспечивает телу три вращательные степени свободы). Так, например, маховик, установленный в приборе Л. Фуко, мог вращатьсся вокруг собственной оси (первая степень свободы), вместе с внутренним кольцом карданова подвеса мог поворачиваться вокруг оси ножевых опор (вторая степень свободы) и вместе с внутренним и наружным кольцами карданова подвеса мог поворачиваться вокруг вертикальной оси, слегка закручивая шелковую нить (третья степень свободы).

В своем приборе Л. Фуко постарался в максимальной степени выполнить условия Эйлера: вращающееся тело (маховик) имело одну неподвижную точку, а именно точку пересечения осей маховика, внутреннего и наружного кардановых колец; чтобы свести к минимуму возмущающие моменты, действующие на маховик, были применены самые совершенные из известных тогда опор — ножевые опоры и шелковая нить; узел «маховик — внутреннее кольцо» был тщательно отбалансирован, то есть центр масс узла был совмещен с неподвижной точкой, что в отличие от волчка сводило к нулю момент, создаваемый силой тяжести самого узла. Отмечая низкий уровень возмущающих моментов, Л. Фуко писал, что подвижные узлы прибора «приходили в движение от малейшего дуновения».

Почему так много внимания уделил Л. Фуко устранению моментов внешних сил? Что бы произошло, если бы вокруг осей карданова подвеса действовали бы достаточно большие возмущающие моменты, например моменты трения опор?

Предположим, что маховик раскручен и обладает кинетическим моментом H, а вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса действует момент трения $M_{тр}$, создаваемый ножевыми опорами. Пусть векторы этих моментов направлены так, как показано на рис 6. Дальше произойдет следующее: маховик начнет прецессировать (вспомним правило прецессии), пытаясь совместить век-

тор $\overline{H}$ с вектором $\overline{M}_{тр}$ по кратчайшему пути, при этом маховик вместе с кольцами карданова подвеса начнет поворачиваться в горизонтальной плоскости, закручивая шелковую нить. Вектор угловой скорости прецессии $\overline{\omega}_п$ будет направлен вдоль оси наружного кольца карданова подвеса (вдоль шелковой нити) вверх.

Прецессия вызовет появление гироскопического момента $\overline{M}_г$, который (вспомним правило Н. Е. Жуковского) будет стремиться совместить вектор $\overline{H}$ с вектором $\overline{\omega}_п$ по кратчайшему пути. Гироскопический момент будет направлен противоположно моменту трения и равен ему по величине. В результате внутреннее кольцо карданова подвеса не будет поворачиваться вокруг своей оси, то есть оси ножевых опор, но прецессия будет продолжаться. Вот этой нежелательной, губительной для положительного результата опыта прецессии, пытался не допустить Л. Фуко, принимая все меры к снижению возмущающих моментов.

Действие своего прибора Л. Фуко продемонстрировал членам Парижской академии наук 27 сентября 1852 г.

С помощью специального устройства маховик был приведен в быстрое вращение и дальше работал на выбеге. Ось вращения маховика была выставлена в плоскость горизонта (направлена горизонтально). Стрелка, связанная с наружным кардановым кольцом, установлена на нулевой отметке шкалы.

Ожидалось, что ось маховика начнет совершать кажущийся поворот вокруг вертикальной оси прибора со скоростью, равной вертикальной составляющей скорости вращения Земли ($U\sin\varphi$) на широте Парижа.

Учитывая, что широта Парижа $\varphi_{Пар} \approx 49°$, кажущаяся скорость вращения стрелки должна была быть

$$U\sin\varphi = 15°/ч \cdot \sin 49° \approx 11°/ч.$$

Так как ожидался достаточно медленный поворот стрелки, то для наблюдения за ее движением применялся микроскоп. Опыт удался частично: только в первые минуты после запуска маховика стрелка действительно двигалась справа налево, а затем движение ее становилось хаотичным. Объяснялось это тем, что маховик слишком быстро терял скорость вращения и даже незначительные возмущающие моменты трения ножевых

опор вызывали хаотическую прецессию оси маховика в плоскости горизонта.

Уже первые опыты обнаружили еще одно интересное свойство гироскопа — практическую безынерционность прецессионного движения маховика. Если к маховику мгновенно приложить и снять момент внешних сил (например, слегка ударить молоточком по внутреннему кольцу карданова подвеса), то также практически мгновенно возникнут и исчезнут угловая скорость прецессии и гироскопический момент (явления, связанные с квазиупругим эффектом, здесь не рассматриваются). В результате внутреннее кольцо не повернется вокруг своей оси. Всякое другое материальное тело в подобной ситуации продолжало бы двигаться по инерции, отклоняясь все дальше от начального положения.

У маховика гироскопа движение по инерции также есть, но оно выражается не в одностороннем отклонении от начального положения, а в мелком, быстро затухающем дрожании около этого положения.

Мелкое, быстро затухающее дрожание маховика называется **нутацией**, что в переводе с латинского языка означает «колебание».

В своих докладах Парижской академии наук Л. Фуко указал также на то, что маховик его прибора, лишенный одной степени свободы, должен стремиться совместить ось своего вращения с вектором абсолютной переносной скорости вращения основания. Теперь этот результат легко можно получить с помощью правила Н. Е. Жуковского, во времена же Л. Фуко это было неожиданным открытием. Впечатление еще более усилилось, когда Л. Фуко пояснил, что с помощью гироскопа, имеющего только две степени свободы, можно определять направление на Северный полюс Земли и широту места установки прибора.

Представим себе гироскоп, маховик которого имеет только две степени свободы, а именно: вращение с большой скоростью вокруг собственной оси и возможность поворота вокруг оси внутреннего карданова кольца. Позже подобные приборы стали называться гироскопами с двумя степенями свободы, или *двухстепенными гироскопами*.

Л. Фуко рассмотрел два характерных положения двухстепенного гироскопа относительно поверхности вращающейся Земли.

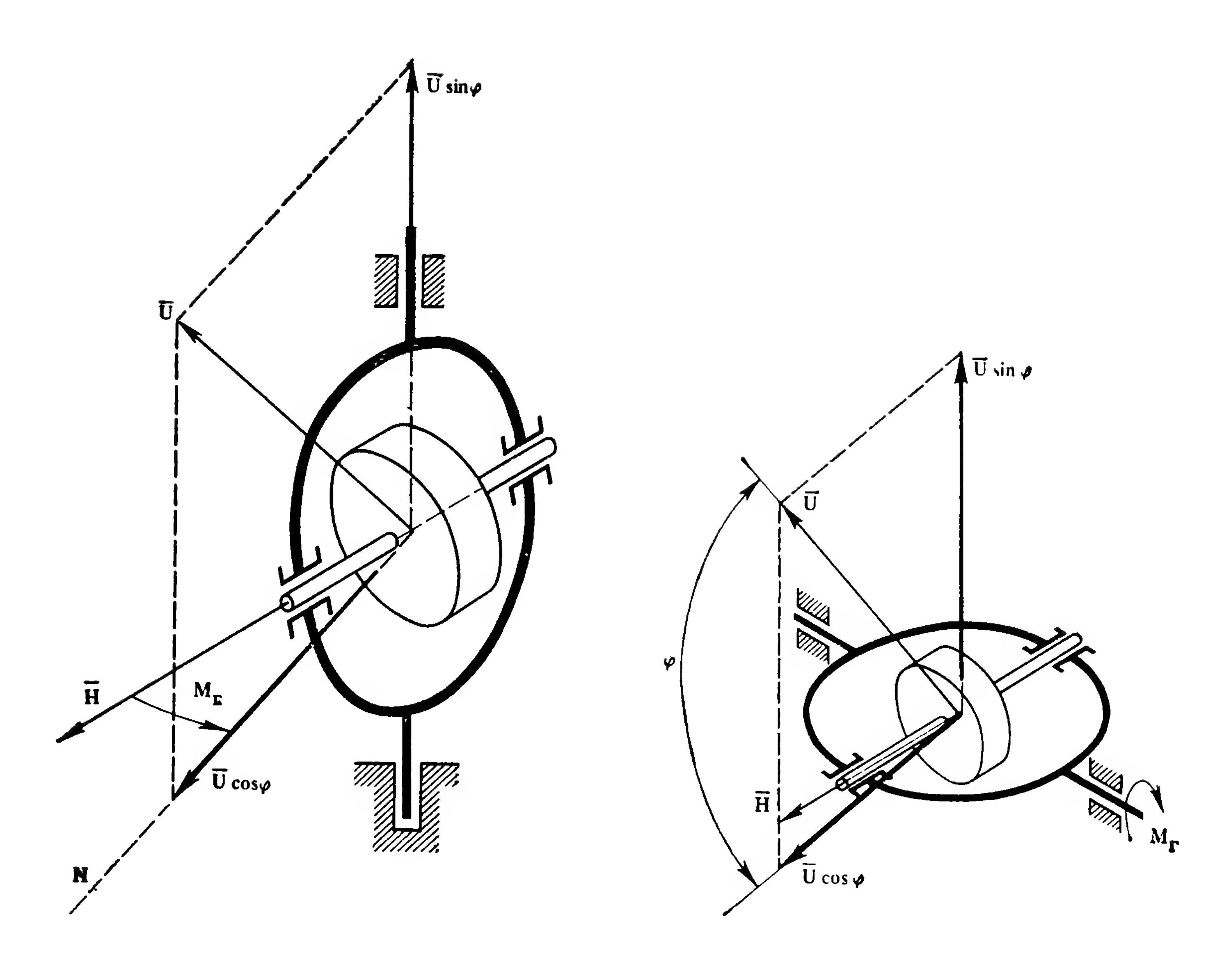


Рис. 7.
Гирокомпас Л. Фуко

Рис. 8.
Гироширот Л. Фуко

Первое: ось внутреннего кольца карданова подвеса вертикальна, и гироскоп участвует в переносном вращении Земли со скоростью $\overline{U}$, вектор которой может быть разложен на две составляющие $\overline{U}\sin\varphi$ и $\overline{U}\cos\varphi$ (рис 7). В этом случае в соответствии с правилом Н. Е. Жуковского возникают два гироскопических момента. Один из них будет стремиться совместить вектор $\overline{H}$ с вектором $\overline{U}\sin\varphi$. Но этого совмещения не произойдет, так как на пути совмещения стоят опоры внутреннего кольца карданова подвеса. Этот момент будет создавать лишь давление на опоры.

Другой гироскопический момент будет стремиться совместить вектор $\overline{H}$ с вектором $\overline{U}\cos\varphi$. Это совмещение возможно, так как опоры допускают поворот маховика вокруг вертикальной оси. Совершая затухающие колебания в горизонтальной плоскости, ось вращения маховика через некоторое время совместится с направлением вектора $\overline{U}\cos\varphi$. Но ведь вектор $\overline{U}\cos\varphi$ лежит в плоскости меридиана и направлен на Северный полюс Земли! Зна-

чит, материальное тело — ось вращения маховика — также будет направлено на Северный полюс Земли. Получился компас, который в отличие от магнитного компаса указывает направление не на магнитный, а на географический полюс Земли.

Этот прибор позднее был назван гироскопом Фуко первого рода, или **гирокомпасом Фуко.**

Второе положение гироскопа: ось внутреннего кольца карданова подвеса горизонтальна, а ось маховика расположена в плоскости меридиана (рис. 8). В этом случае также возникнет гироскопический момент, который совместит вектор $\overline{H}$ с вектором $\overline{U}$. В совмещенном положении угол между осью вращения маховика и горизонтальной плоскостью оказывается равным широте φ. Этот прибор позднее был назван гироскопом Фуко второго рода, или **гироширотом.**

Таким образом, особым свойством двухстепенного гироскопа является его способность мгновенно реагировать на угловую скорость вращения основания, на котором он установлен, пытаясь совместить по кратчайшему пути ось вращения маховика (вектор кинетического момента) с соответствующей составляющей вектора угловой скорости вращения основания.

Лишив трехстепенной гироскоп одной степени свободы, Л. Фуко открыл замечательное свойство двухстепенного гироскопа. Ну а если пойти дальше и лишить маховик гироскопа второй степени свободы, не получим ли мы при этом каких-либо полезных эффектов? Получим. Уже давно известно, что вращающийся маховик способен запасать кинетическую энергию, которую затем он может расходовать на приведение в действие различных механизмов и на повышение плавности их работы. В частности, всем знакомы детские игрушки — инерционные автомобильчики. Чиркнув пару раз колесами такого автомобиля по полу, раскручивают маховичок, установленный внутри него. А затем уж маховичок, отдавая свою энергию колесам автомобиля, заставляет его двигаться.

Эта идея используется не только в игрушках. Сегодня разрабатываются транспортные средства с экологически чистыми маховичными двигателями. Уже по улицам городов движутся опытные образцы троллейбусов и автобусов, приводимые в движение энергией маховиков.

Возникают ли гироскопические моменты в маховичных приводах? Конечно, возникают, но так как, кроме собственного вращения, других степеней свободы маховик не имеет, то и его видимого движения не наблюдается. Гироскопические моменты в этом случае оказывают лишь давление на опоры маховика, что является отрицательным явлением.

Таким образом, хотя маховичные приводы — очень полезные устройства, к гироскопическим приборам они прямого отношения не имеют.

Итак, в своих работах Л. Фуко указал на принципиальную возможность создания гироскопических приборов трех различных назначений: свободного гироскопа, способного хранить неизменной ориентацию оси маховика в абсолютном пространстве, гироскопического компаса, гироскопического измерителя широты.



СЕРДЦЕ ПРИБОРА

ГЛАВА



. . . Эксперимент Фуко и его идеи, в которых опускались детали, но выделялась суть ожидаемых явлений, имели историческое значение, ибо они привлекли внимание широких научных кругов к возможностям использования гироскопов .

А.Ю Ишлинский

Причина неудачи опыта Л. Фуко. Двигатель постоянного тока как привод маховика. Пневматический привод маховика. Асинхронный гиромотор. Проблемы быстроходных электродвигателей. Малые смещения центра масс гиромотора вызывают большие ошибки гироприборов. Требуются: высокая стабильность скорости вращения маховика, большой срок службы скоростных опор, малое время разгона маховика

Маховик набирает скорость

После опытов с гироскопом к Л. Фуко приходит научное признание. По рекомендации академика Бориса Семеновича Якоби, высоко ценившего научные работы Фуко и его личные качества, Петербургская Академия наук в 1855 г. избирает Фуко своим членом-корреспондентом. По свидетельству самого ученого, это послужило сигналом к признанию его научных заслуг и на его родине, во Франции.

Однако остается фактом, что Фуко не удалось отчетливо подтвердить экспериментом свои принципиально верные мысли. «Вестник Академии наук СССР» писал в 1955 г. в юбилейной статье, посвященной Фуко: «В 1852 г. Леон Фуко построил замечательный прибор — гироскоп. Лет сорок этот прибор служил в физических ка-

бинетах к смущению профессоров и лаборантов и на радость студентов потому, что при демонстрации он или показывал, что Земля вращается в обратную сторону, или что она вращается в десятки раз быстрее, чем на самом деле. Происходило это потому, что прибор требовал необыкновенно точной выделки и регулировки, которая часто расстраивалась». К этому нужно добавить, что маховик гироскопа Фуко, работавший на выбеге, из-за трения в опорах и трения о воздух быстро терял скорость вращения, что не позволяло вести достаточно длительные наблюдения.

Нужно было найти способ «продлить жизнь» гироскопа, заставить его сердце — маховик вращаться без замедления, работать ритмично как часы. Таким образом, на пути практического применения гироскопа встала первая проблема — обеспечить вращение маховика с достаточно высокой и постоянной угловой скоростью. Все, что применялось для привода маховика до сих пор — сила пальцев человека, винт, рейка, шнур, не годилось И тогда обратились к «магнитной машине» академика Б. С. Якоби (1801—1874). Еще в 1834 г. Б. С. Якоби создал первую технически завершенную конструкцию двигателя постоянного тока, который с тех пор начал завоевывать все новые области применения. В 1865 г. уже существовали два гироскопических прибора, в которых маховик приводился во вращение с помощью двигателя постоянного тока. Первый прибор — лабораторный макет трехстепенного гироскопа — был построен самим Б. С. Якоби, второй прибор (попытка реализовать гирокомпас Фуко) принадлежал французскому инженеру Ж. Труве. В приборе Ж. Труве скорость маховика составляла примерно 300 об/мин.

Электродвигатель постоянного тока решил важную проблему поддержания скорости вращения ротора. Однако с гироскопической точки зрения двигатель постоянного тока имел и имеет существенные недостатки, основные из которых — низкие скорости вращения ротора и коллекторный узел в конструкции двигателя. Этот узел предназначен для передачи электрической энергии с корпуса прибора через вращающийся вал на обмотки ротора. Он состоит из колец, расположенных на валу, и скользящих по ним графитовых щеток, укрепленных на корпусе двигателя. В результате трения щеток о кольца происходят их износ, загрязнение конструкции продук-

тами износа, искрение, разбалансировка подвижного узла.

Недостатки двигателя постоянного тока оказались настолько серьезными, что для привода маховика гироскопа он дальнейшего развития не получил. Создалась тупиковая ситуация. А бурно развивавшийся в те годы морской бронированный надводный и подводный флот остро нуждался в точных и надежных приборах для указания курса и для создания горизонтальных площадок на качающейся палубе корабля. Эти задачи успешно могли быть решены только с помощью гироскопических приборов, но надежного привода маховика гироскопа все еще не было...

1886 год. Французская академия наук присуждает удвоенную премию своему соотечественнику адмиралу Г. Флериэ за «изобретенный им прибор «искусственный горизонт» для секстанта (секстант, в морской лексике секстан, — оптический прибор для определения высот небесных светил).

Однако формулировка Французской академии наук была не совсем точна, так как еще за 100 с лишним лет до Флериэ англичанин Д. Серсон построил и испытал «искусственный горизонт» — прибор аналогичного назначения. Заслуга Флериэ заключалась в другом: он применил новый способ привода маховика — пневматический, который получил затем широкое развитие.

Флериэ решил проблему остроумно. Маховик его прибора был выполнен в виде волчка, центр масс которого располагался ниже (примерно на 1 мм) точки опоры, что придавало волчку устойчивость. Маховик-волчок весил 1,75 Н (180 г) и имел на наружной поверхности лопасти-канавки. Он устанавливался в герметичном корпусе, внутренняя полость которого резиновым шлангом соединялась с ручным насосом. С помощью этого насоса можно было откачивать воздух из корпуса.

Работа с прибором Флериэ представляла весьма живописную картину. Представьте себе палубу военного корабля, на которой установлен стол с этим прибором. За столом офицер-навигатор, у стола бравый матрос с ручным насосом. Для работы с прибором подбирались физически сильные моряки. Некоторые из них, интенсивно работая насосом, создавали разрежение внутри корпуса прибора около 60 мм рт. ст.

После достижения внутри герметичной камеры необходимого разрежения воздуха офицер-навигатор открывал кран, и атмосферный воздух, врываясь внутрь камеры и ударяя в лопасти-канавки маховика, приводил его во вращение. Затем матрос снова откачивал воздух из корпуса. Вот в этом и была «изюминка» изобретения Флериэ. Благодаря малому сопротивлению сильно разреженной среды маховик вращался (со скоростью примерно 3000 об/мин) по тем временам достаточно долго — около 30 мин. Этого времени вполне хватало для проведения точных измерений.

После того как ручной насос был заменен вакуум-насосом с приводом от электродвигателя, а на самолетах — трубкой Вентури, пневматический привод нашел широкое применение и долгое время успешно соперничал даже с получившим распространение приводом маховика от электродвигателя переменного тока.

С пневматическим приводом маховика были разработаны и успешно эксплуатировались в авиации такие приборы, как гирополукомпас, гировертикаль, указатель поворотов, гироскопические приборы автопилотов самолетов и крылатых ракет (Фау-1).

Пневматический привод, как стационарный привод маховика применялся до конца 50-х гг. XX в., а как ускоритель разгона маховика и импульсный привод используется в настоящее время.

В связи с развитием реактивной авиации, ракетной и космической техники в 50-х гг. резко возросли требования к гироскопическим приборам, и пневматический привод как стационарный привод маховика уже не мог удовлетворять этим требованиям. Хотя маховики пневматических гироскопов вращались в то время со скоростями 10...12 тыс. об/мин, такие скорости уже считались низкими. Кроме того, пневматический привод не обеспечивал нужной стабильности скорости вращения. В то время уже требовались приборы, нестабильность скорости вращения маховика которых составляла доли процента от ее номинального значения. И наконец, сложность и громоздкость обслуживающего оборудования (вакуум-насосов, фильтров, воздухопроводов) делали пневматический привод бесперспективным. Значительно усовершенствованные к 60-м гг. электрические двигатели переменного тока окончательно вытеснили пневматический привод маховика.

В начале 90-х гг. прошлого века на Западе в среде владельцев электростанций постоянного тока и фабрикантов, производивших двигатели постоянного тока, царила паника. Их предприятиям грозил крах, так как несколькими годами раньше, в 1889 г., русский инженер Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862—1919) изобрел и провел успешные испытания первого трехфазного двигателя переменного тока, который позже стал известен как асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора типа «беличье колесо». Новый двигатель не нуждался в коллекторном узле, мог развивать большие вращающие моменты и имел теоретически неограниченную скорость вращения ротора, то есть по многим важным показателям превосходил двигатель постоянного тока. Да, было от чего прийти в уныние промышленникам, делавшим свой бизнес на производстве и использовании постоянного тока. Поддался панике даже великий американский изобретатель Т. Эдисон — владелец первой в мире «фабрики электричества» (так тогда называли электростанции постоянного тока). Он объявил переменный ток противным природе и морали и внес в сенат своего штата проект закона о запрещении его использования. Однако далеко не все сенаторы были заинтересованы в применении только постоянного тока, и законопроект провалили.

Асинхронные трехфазные двигатели начали свое победное шествие, сильно потеснив широко применявшиеся в те годы двигатели постоянного тока. Появление асинхронных двигателей было настоящей технической революцией во многих отраслях промышленности, в том числе и в гироскопическом приборостроении.

Работа асинхронного двигателя основана на использовании так называемого вращающегося магнитного поля, создаваемого статором.

Как известно, магнитное поле может создаваться катушкой, намотанной медным проводом, если по нему пропустить электрический ток. Направление магнитного поля будет совпадать с осью намотки. Если в катушку подавать переменный ток, изменяющийся волнообразно, то и магнитное поле будет то нарастать, то уменьшаться до нуля.

На статоре асинхронного двигателя размещаются три катушки (три фазы), причем оси их намотки располага-

ются в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора, и составляют между собою угол 120°. По катушкам пропускают переменные электрические токи, которые поочередно возрастают и уменьшаются в каждой катушке. В результате этого магнитные поля, создаваемые каждой катушкой, также поочередно возрастают и уменьшаются. Создается иллюзия вращения волны магнитного поля. С аналогичными явлениями мы часто встречаемся в жизни. Вспомним хотя бы расходящиеся круги на воде от брошенного камня или световую рекламу, использующую прием «бегущего огня». А иллюзия движения огня создается благодаря тому, что лампочки в гирлянде зажигаются по очереди через равные промежутки времени.

Итак, статор создает вращающееся магнитное поле. Оно пересекает короткозамкнутую обмотку («беличье колесо»), размещенную на роторе. В результате этого пересечения в обмотке ротора возникают электродвижущие силы и электрические токи. Последние, взаимодействуя с магнитным полем статора, создают момент, приводящий ротор во вращение. Следовательно, необходимым условием возникновения вращающего момента является пересечение обмотки ротора магнитным полем статора. А это возможно лишь в том случае, если магнитное поле статора будет вращаться хотя бы немного быстрее, чем ротор. То есть волна магнитного поля статора как бы обегает вращающийся ротор. Этот принципиальный факт отражен в названии двигателя — асинхронный, что в переводе на русский язык значит «неодновременный», то есть скорости вращения ротора и магнитного поля статора не равные.

Из принципа действия асинхронного двигателя следует, что скорость вращения ротора зависит от скорости вращения магнитного поля статора. А скорость вращения магнитного поля статора, определяемую частотой питающего тока, можно было получать достаточно высокой даже во времена М. О. Доливо-Добровольского.

Гиромотор

Казалось, что проблема получения высоких скоростей вращения маховика решена, нужно только для привода маховика применить

асинхронный двигатель, питаемый переменным током повышенной частоты. Однако первые попытки на этом пути успеха не принесли. Как только скорость вращения маховика стала достигать первых десятков тысяч оборотов в минуту, так, словно злые сказочные силы, возникли новые серьезные технические проблемы — вибрация маховика и его вала, износ опор, большое потребление электрической энергии и как следствие этого сильный нагрев двигателя. Нужно было разобраться в причинах этих вредных явлений и наметить пути их устранения. На это ушло около двадцати лет. И вот в конце первого десятилетия нашего века группа немецких ученых и инженеров, работавших под руководством Г. Аншютца и М. Шулера над созданием гирокомпаса для морского флота, добилась первого успеха: разработанная ими конструкция привода маховика от быстроходного асинхронного двигателя работала вполне удовлетворительно. Конструктивная схема устройства, названного позже гиромотором, оказалась настолько удачной, что с небольшими изменениями применяется и в настоящее время.

При создании этого первого гиромотора были использованы все последние достижения того времени в области механики и электротехники. Так, например, для привода маховика во вращение был применен асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского, состоявший из неподвижной части (статора) и вращающейся части (ротора). Ротор двигателя был запрессован во внутреннюю полость чечевицеобразного маховика, который соединялся с валом тонкой диафрагмой. Вал маховика устанавливался в корпусе (гирокамере) на шариковых подшипниках, которые обильно смазывались жидкой смазкой, подводимой с помощью специальных хлопчатобумажных фитилей. Вся наружная поверхность маховика была закрыта гирокамерой — «оболочкой» (по выражению М. Шулера). Асинхронный двигатель питался трехфазным током (напряжение — 120 В, частота — 330 Гц) и вращал маховик со скоростью около 20 тыс. об/мин. Диаметр маховика составлял 130 мм.

Основной характеристикой любого гиромотора является его кинетический момент H. В первой главе мы уже упоминали об этом важном параметре, теперь расскажем о нем более подробно.

Кинетический момент гиромотора равен произведению момента инерции всех вращающихся деталей (ма-

ховика, диафрагмы, вала, колец подшипников и т. д.), взятого относительно оси вращения, на угловую скорость их вращения, то есть $H = I_z \Omega$. Момент инерции I_z — величина, характеризующая массу вращающегося тела и размещение этой массы относительно оси вращения. Если маховик гиромотора упрощенно представить как пустотелый цилиндр, то его момент инерции относительно оси вращения будет

$$I_z = m \frac{R^2 + r^2}{2},$$

где R и r — соответственно наружный и внутренний радиусы цилиндра, а m — его масса. Таким образом, чем больше скорость вращения и наружный радиус маховика, а также его масса, тем больше кинетический момент и тем сильнее проявляются гироскопические эффекты.

Чтобы, не увеличивая наружных размеров гиромотора, увеличить его кинетический момент, электродвигатель размещают внутри маховика и выполняют его по так называемой обращенной схеме — статор внутри ротора, а не наоборот, как это делается в двигателях общетехнического назначения.

Другие резервы повышения H при малых габаритах гиромотора состоят в увеличении скорости вращения маховика и его массы. Последнее достигается изготовлением маховика из тяжелых сплавов на основе вольфрама, получаемых методом порошковой металлургии. Удельный вес таких сплавов примерно в 2 раза больше, чем сталей.

Практика эксплуатации гироприборов показала, что очень сильно увеличивать скорость вращения маховика и его наружный радиус нельзя, так как в этом случае возникают отрицательные явления, которые превалируют над положительными.

Злейший враг всех быстровращающихся устройств — вибрация. Если не принимать мер для ее снижения, то она, разрушая опоры и раскачивая конструкцию в целом, быстро выводит ее из строя. Основная причина появления вибрации быстровращающихся тел — несимметричность распределения масс этих тел относительно оси вращения, или, как говорят специалисты, динамическая неуравновешенность вращающегося тела.

Теоретические основы движения динамически неуравновешенных систем и методы устранения динамической не-

уравновешенности были разработаны лишь в конце 30-х гг. академиком А. Н. Крыловым. А в начале века достаточно полной ясности в этом вопросе не было. Поэтому Аншютц и Шулер пошли на то, что в своей конструкции гиромотора применили тонкий гибкий вал и гибкую диафрагму, которые при вращении маховика изгибались так, что вибрация конструкции становилась минимальной. Возникало явление самоцентрирования маховика, которое вполне решало проблему устранения вибрации. Однако гибкий вал, обеспечивая самоцентрирование маховика, создавал и ряд отрицательных явлений, которые стали отчетливо проявляться, когда гироскопические приборы начали устанавливать на объектах, двигавшихся с большими ускорениями. Поэтому в дальнейшем с развитием и совершенствованием техники динамического уравновешивания вращающихся тел от гибких валов отказались.

Вращающий момент двигателя (для поддержания скорости вращения маховика) должен быть равен моменту сил сопротивления вращению маховика, а в режиме разгона ротора значительно превосходить его. По сравнению с двигателями общетехнического назначения ротор гиромотора вращался с громадными скоростями, что порождало малоизученный тогда момент сопротивления воздуха — аэродинамический момент. Момент этот оказался достаточно большим, для его преодоления гиромотор потреблял из сети большую электрическую мощность, сильно нагревался, ротор терял скорость. Стало ясно: без значительного снижения аэродинамического момента качественно работающий гиромотор не создать.

Проведенные исследования показали, что аэродинамический момент есть в основном результат турбулентного (вихревого, хаотического) движения воздуха, вызываемого вращением маховика.

Чтобы снизить аэродинамический момент, нужно создать ламинарное (плавное) течение воздуха у поверхности вращающегося маховика. В первой конструкции гиромотора это было достигнуто с помощью следующих мер: маховику придали наиболее обтекаемую чечевицеобразную форму, все наружные поверхности маховика имели высокий класс чистоты поверхности, все острые кромки на поверхности маховика были закруглены и, наконец, сам маховик был заключен в гирокамеру. Меры

оказались эффективными, аэродинамический момент снизился до допустимых значений. Для улучшения отвода тепла, выделяемого статором двигателя, в крышках гирокамеры были сделаны круглые вентиляционные отверстия.

Применение гирокамеры оказалось полезным во многих отношениях, в частности, ее стали использовать в качестве внутреннего кольца карданова подвеса.

Слабым звеном в конструкции гиромотора был и остается шариковый подшипник. Это объясняется тем, что подшипник в гиромоторе работает в исключительно тяжелых условиях: высокие скорости вращения (20 тыс. об/мин у первых гиромоторов и до 60 тыс. об/мин у современных), вызванные этими скоростями интенсивные вибрационные нагрузки и сильный нагрев подшипника, значительные осевые и радиальные нагрузки, обусловленные ускорениями объекта, на котором установлен гиромотор. Эти тяжелые «условия жизни» быстро расшатывали «здоровье» подшипника, и он с истертыми шариками и выкрошенными беговыми дорожками колец прекращал свое существование. Полвека пришлось затратить ученым, инженерам и технологам на то, чтобы значительно усовершенствовать скоростные шарикоподшипниковые опоры гиромоторов. Но и сегодня проблему нельзя считать решенной окончательно. В современных гиромоторах от шариковых подшипников требуется не только выстоять определенное время, сохранив работоспособность, но и обеспечить еще целый ряд показателей, важнейшим среди которых является стабильность положения центра масс гиромотора.

Необычное требование

Представим себе, что гиромотор установлен на подшипниках в наружном кольце карданова подвеса, а само кольцо также на подшипниках — в корпусе прибора (рис. 9). Получилась классическая модель гироскопа с тремя степенями свободы, где роль внутреннего кольца карданова подвеса играет гирокамера. Ну а что произойдет, если центр масс гиромотора сместится вдоль оси вращения? Предположим, что до запуска гиромотор был идеально уравновешен и его центр масс находился в точке O пересечения осей

колец карданова подвеса и оси вращения маховика. Сила веса G, приложенная в центре масс, не создавала момента вокруг осей карданова подвеса, так как ее плечо относительно этих осей было равно нулю.

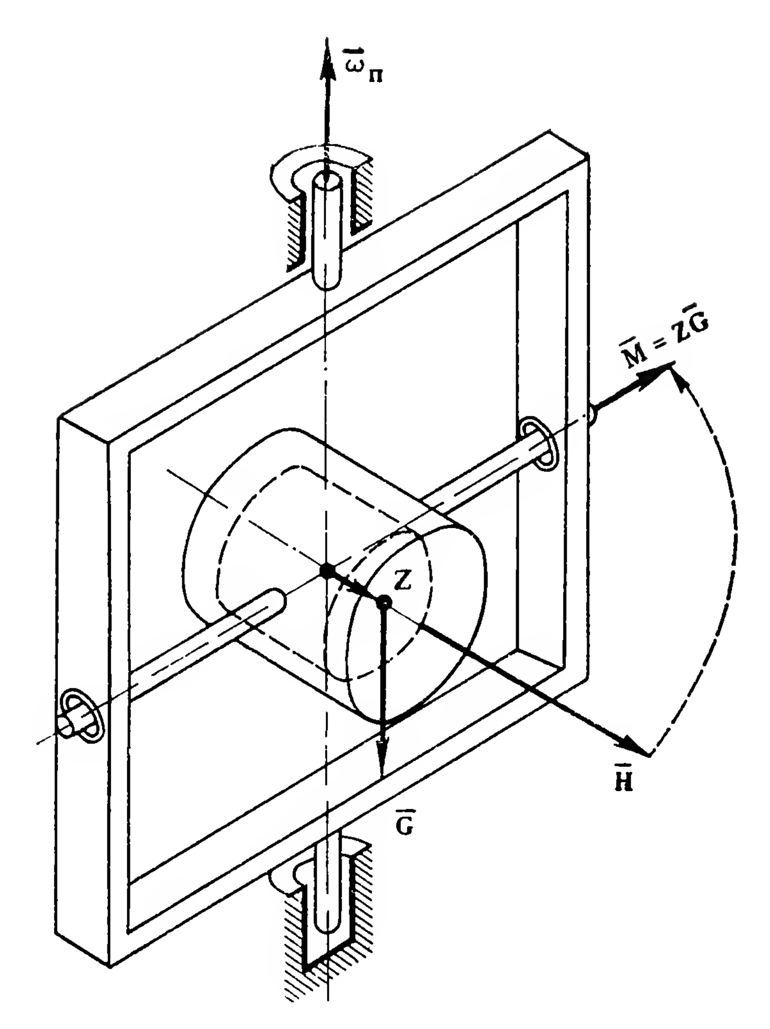


Рис. 9.
Прецессия гироскопа, вызванная смещением центра масс гиромотора

После запуска гиромотор приобретает кинетический момент H. В результате тепловых и упругих деформаций конструкции гиромотора, изменения толщины смазочной пленки в подшипниках, а также действия многих других причин, которые трудно учесть, центр масс смещается вдоль оси вращения маховика на величину z. Теперь уже сила веса G приложена к смещенному центру масс и создает момент $M=zG$ вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса на плече z.

Направление вектора этого момента показано на рис. 9. В результате действия момента M наружное кольцо карданова подвеса вместе с гиромотором начинает прецессировать (поворачиваться вокруг своей вертикальной оси), стремясь совместить вектор $\bar{H}$ с вектором $\bar{M}$ по кратчайшему пути. Направление прецессии и ее вектор $\bar{\omega}_п$ также показаны на рис. 9.

Поскольку момент M вызывается непредсказуемым заранее смещением центра масс гиромотора, то и вызываемая им прецессия гироскопа получается неконтролируемой, случайной. Такая прецессия уводит ось вращения маховика от заданного направления, то есть вызывает ошибки гироприборов.

Велика ли скорость этой «вредной» прецессии? Решим простейший пример. Допустим, что гиромотор имеет кинетический момент $H = 100$ Н·см·с. Такой гиромотор весит около 10 Н (1 кГ) и имеет объем чуть больше поло-

вины граненого стакана. Пусть центр масс этого гиромотора сместится на величину $z=1$ мкм. Попробуйте представить себе этот линейный размер. Вероятнее всего, у вас ничего не получится, так как в быту с такими размерами мы не встречаемся. Для сравнения: толщина лезвия безопасной бритвы составляет 80...100 мкм, то есть мы задали смещение центра масс гиромотора примерно в 100 раз меньшее, чем толщина лезвия бритвы.

Вычислим скорость «вредной» прецессии

$$\omega_{\text{п}}=\frac{M}{H}=\frac{zG}{H}=\frac{10^{-4}\text{см}\,10\text{Н}}{10^{2}\text{Н}\cdot\text{см}\cdot\text{с}}=10^{-5}\,\frac{\text{рад}}{\text{с}}\approx 2^{\circ}/\text{ч}.$$

По современным понятиям, эта скорость прецессии достаточно большая, так как в настоящее время требуются гироскопы, неконтролируемая скорость прецессии («дрейф») которых составляла бы 0,01...0,001 °/ч. Следовательно, положение центра масс гиромотора нужно удерживать с точностью, в 100...1000 раз большей 1 мкм. Эта задача до конца не решена в настоящее время, хотя гироскопы с дрейфом около 0,05°/ч уже созданы.

Следует особо подчеркнуть, что стабильное положение центра масс должно обеспечиваться в реальных условиях эксплуатации, когда ротор гиромотора вращается с огромными скоростями, а сам гиромотор, установленный на движущемся объекте, интенсивно нагревается и подвергается действию постоянных и быстроменяющихся нагрузок.

Чтобы повысить стабильность положения центра масс, были разработаны специальные конструкции гиромоторов. Одна из них представлена на рис. 10.

Детальные исследования, проведенные советскими и зарубежными учеными, показали, что меньшим смещением центра масс обладают симметричные конструкции гиромоторов. Термин «симметричные» здесь следует понимать широко, имея в виду не только геометрическую симметрию, но и симметрию тепловую (равномерный нагрев конструкции), и симметрию упругих свойств конструкции.

Чтобы обеспечить тепловую симметрию, снизить нагрев и момент газодинамического сопротивления, гиромотор заключают в герметичную гирокамеру. Это позволяет создать внутри гирокамеры газовую среду с оптимальными тепловыми и газодинамическими характеристиками. Обычно в качестве такой среды используют во-

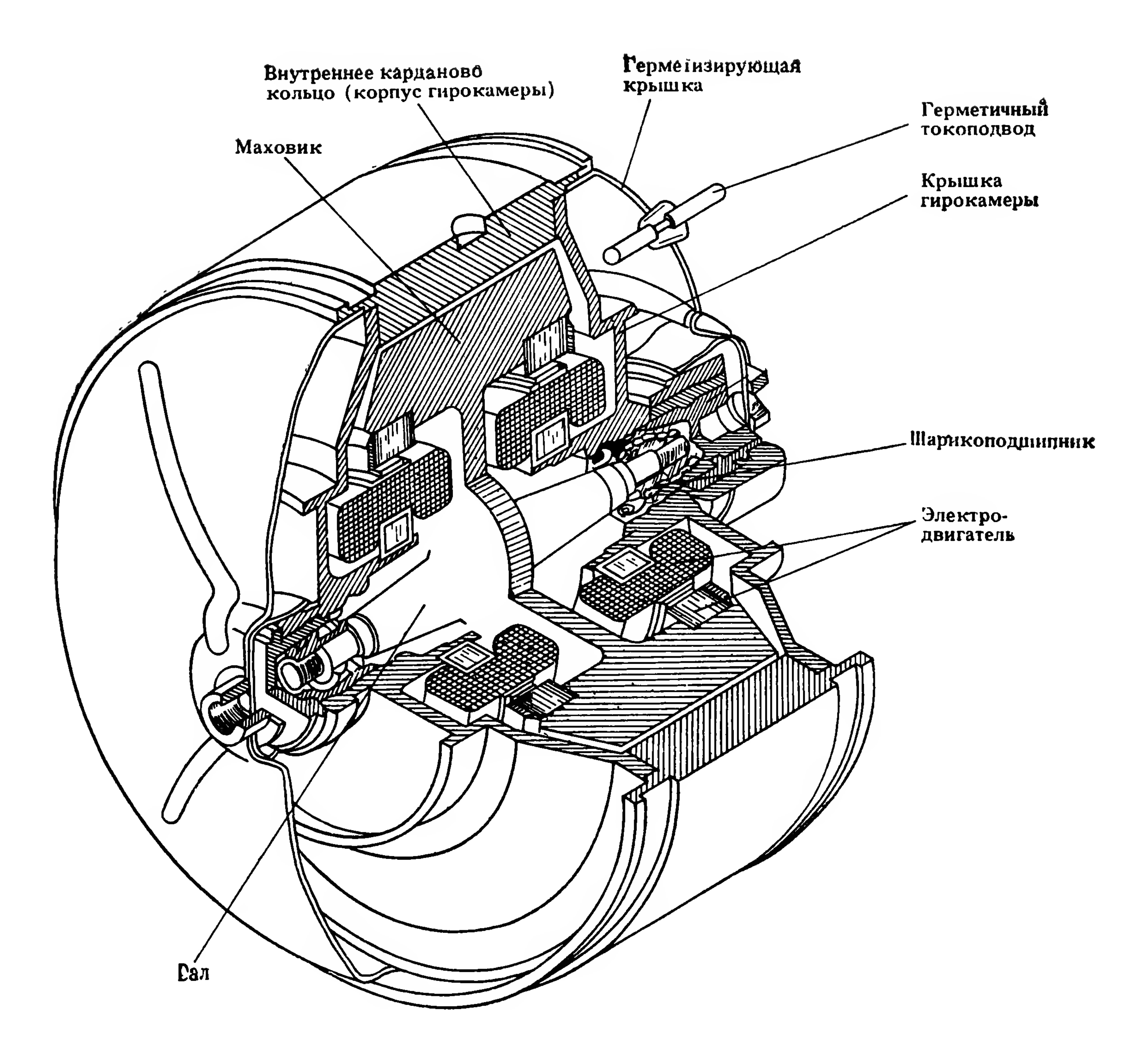


Рис. 10.
Современный гиромотор

дород с небольшой примесью гелия, давление этой газовой смеси обычно в 2...2,5 раза меньше атмосферного.

Реже применяют **вакуумные гиромоторы**, то есть гиромоторы, маховики которых вращаются в сильноразреженной газовой среде.

Для обеспечения симметричности конструкции применяют два электродвигателя, вращающих общий симметричный маховик. Жесткости отдельных деталей гиромотора (вала, шариковых подшипников, крышек гирокамеры и др.) подобраны так, что конструкция гиромотора обладает не только высокой общей жесткостью, но и примерно одинаковой жесткостью в направлении любых осей ее симметрии. Эти и ряд других мер позволили создать работоспособные конструкции гиромоторов, обеспечивающие на определенном этапе развития гироскопического приборостроения достаточные точности.

Однако требования к точности гироскопических приборов продолжают возрастать, поэтому вопрос о стабильности положения центра масс гиромотора нельзя считать окончательно решенным.

Другие требования к гиромотору

Точность работы целого ряда гироскопических приборов зависит от постоянства скорости вращения маховика гиромотора (точнее, от стабильности кинетического момента ротора гиромотора). Широко применяемые в гиромоторах асинхронные двигатели могут обеспечить постоянство скорости вращения маховика лишь с точностью 0,5...1%. Для многих современных гироскопических приборов и систем этого совершенно недостаточно, поскольку требуется выдерживать постоянство скорости вращения маховика с точностью порядка сотых и тысячных долей процента Такие точности могут быть обеспечены с помощью синхронных двигателей переменного тока. Как следует из названия двигателя, его ротор вращается с такой же скоростью, с какой вращается магнитное поле, создаваемое статором, то есть вращение поля и ротора одновременное (синхронное). Следовательно, чтобы обеспечить постоянство скорости вращения маховика, нужно обеспечить постоянство скорости вращения магнитного поля. А эта задача для современной техники уже вполне по силам.

Первый гиромотор с синхронным двигателем был создан советским инженером Б А. Талалаем еще в 1926 г. Однако практического применения он не нашел, так как в то время особой потребности в таких гиромоторах не было, да и сам двигатель по многим показателям уступал асинхронным.

С конца 50-х гг в гиромоторах находят широкое применение синхронные гистерезисные двигатели.

«Гистерезисная машина» была предложена в 1900 г. выдающимся ученым-электротехником Ч П Штейнмецом, который за свои политические убеждения в конце прошлого века вынужден был иммигрировать из Европы в Америку. Немало трудностей пришлось преодолеть молодому иммигранту, прежде чем он сумел завоевать огромный авторитет и стать ведущим специалистом кон-

церна «Дженерал электрик». За выдающиеся достижения в области электротехники Ч. Штейнмеца называли «чудодеем электричества», а хозяева концерна откровенно говорили, что их главный капитал не в сотнях миллионов долларов, а в «гениальном мозгу доктора Штейнмеца». Великую Октябрьскую революцию Ч. Штейнмец встретил восторженно, оказывал посильную моральную помощь молодой Советской Республике, состоял в дружеской переписке с В. И. Лениным.

Как же устроен синхронный гистерезисный двигатель? Статор его аналогичен статору асинхронного гиромотора, а вот ротор представляет собою кольцо, изготовленное из магнитотвердого материала, то есть из материала, пригодного для изготовления постоянных магнитов. Включенный в трехфазную электросеть, статор создает вращающееся магнитное поле, которое намагничивает ротор. В результате на роторе возникают северный и южный магнитные полюса. Теперь ротор очень напоминает стрелку магнитного компаса. А как известно, на стрелку действует момент, который стремится совместить ее ось с направлением силовых линий магнитного поля Земли.

В гистерезисном двигателе роль направляющего магнитного поля играет вращающееся магнитное поле статора. Магнитная ось ротора, стремясь совместиться с волной вращающегося магнитного поля, устремляется вслед за ней. Вращаясь, ротор преодолевает моменты сопротивления, поэтому догнать волну магнитного поля статора магнитная ось ротора не может, но через некоторое время, называемое временем входа в синхронизм, ротор приобретает так называемую синхронную скорость вращения, равную скорости вращения волны магнитного поля статора. В дальнейшем среднее значение синхронной скорости ротора выдерживается с высокой точностью. Теперь задача состоит в том, чтобы обеспечить высокую стабильность скорости вращения самого магнитного поля статора. Эта задача решается с помощью специальных электронных источников питания гиромотора, так называемых статических преобразователей, имеющих очень высокую стабильность частоты выходного напряжения.

Надо сказать, что почти полвека изобретенный Ч. Штейнмецом синхронный гистерезисный двигатель не находил широкого применения. И только в конце 50-х гг.,

когда были созданы высококачественные магнитотвердые материалы для ротора, этот двигатель был с успехом применен в гиромоторах и в основном решил проблему обеспечения постоянства скорости вращения маховика.

Для многих приборов, применяемых в морском флоте, авиации, на космических кораблях, требуются гиромоторы, которые могли бы исправно работать длительное время — десятки тысяч часов и более. Доведенные до высокой степени совершенства, современные шариковые подшипники пока обеспечивают качественную работу гиромотора (в зависимости от скорости вращения маховика) в течение нескольких тысяч часов. В тех случаях, когда требуются особо длительные сроки работы гиромоторов, разработчики приборов вынуждены идти на снижение скорости вращения маховика, а это, как мы уже знаем, ослабляет полезные гироскопические эффекты и снижает точность приборов.

Основная причина, ограничивающая срок службы шариковых подшипников, — механический контакт между шариками и кольцами и как результат этого износ деталей подшипника, вызывающий недопустимые смещения центра масс и вибрацию ротора гиромотора.

Принципиальное решение этой проблемы ясно — нужно создать и применить бесконтактные опоры, к которым относятся опоры с газовой смазкой, магнитные и электростатические подвесы. Идея использования газа в качестве смазочного вещества, исключающего механический контакт между шипом (концом вала) и подшипником, а следовательно, и износ опоры, была высказана еще в середине прошлого века. Однако практическая реализация этой идеи началась лишь в конце 20-х гг., когда американская фирма «Сперри» создала гировертикаль, сферический ротор которой поддерживался над внутренней поверхностью сферической бронзовой чаши с помощью тонкой прослойки воздуха, нагнетаемого в зазор с помощью компрессора. В дальнейшем, в начале 50-х гг., была предложена конструкция газовой опоры, не требующая компрессора и другого вспомогательного оборудования. Оба конца (шипа) вала маховика устанавливались в цилиндрических отверстиях (подшипниках) в крышках гирокамеры. Причем зазор между шипом и подшипником составлял несколько микрометров. Пока вал не вращался, шипы лежали на подшипниках, в ре-

зультате чего зазор между ними с каждой стороны имел вид изогнутого клина. Когда маховик с помощью двигателя приводился во вращение, то газ (чаще всего гелий), находившийся в зазоре и увлекаемый вращающимся шипом, также начинал вращаться и создавать радиальное давление в зазоре. Давление газа было больше в узкой части клинообразного зазора, и поэтому вал и маховик «всплывали» на тонкой газовой прослойке. После «всплытия» шипы вала вращались без механического контакта с подшипниками, и износа опор не происходило. Эта опора имеет много привлекательных качеств: она несложна по конструкции, исключает механический контакт, решая проблему долговечности, обеспечивает плавность вращения маховика, обладает примерно такой же жесткостью, как и шариковый подшипник.

Но, к сожалению, опора не лишена и очень серьезных недостатков. Поскольку газовый подшипник может устойчиво работать лишь при относительно низких скоростях вращения вала (порядка 30 тыс. об/мин) и подъемная сила его при этих скоростях невелика, то гиромоторы с газовыми опорами строятся пока малогабаритными, с малыми кинетическими моментами. Во время запуска и остановок ротора гиромотора возникает механический контакт между шипом и подшипником и, следовательно, их износ. Чтобы свести износ к минимуму, многие детали гиромотора (в том числе шип и подшипник) делали из очень твердого и износоустойчивого материала — керамики. По этой причине первые гиромоторы с газовыми опорами называли **керамическими.** Теперь проблему износа решают напылением износостойкой пленки на рабочие поверхности шипа и подшипника.

Так как износ опор происходит лишь в моменты запуска и остановок, то срок службы гиромотора с газовыми опорами оценивается не числом часов работы, а числом запусков и остановок. Это число у современных гиромоторов составляет несколько сотен. Существенным недостатком гиромоторов с газовыми опорами является исключительная сложность их изготовления. Судите сами: поскольку зазор между шипом и подшипником составляет единицы микрометров, то точность изготовления поверхностей шипа и подшипника должна составлять десятые доли микрометра. Это выполнить очень сложно вообще, а на твердых, плохо поддающихся механической обработке керамических деталях в особенности. Так что

гиромоторы с газовыми опорами, принципиально решающие проблему долговечности гироприборов, нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

В настоящее время промышленность выпускает большое количество разнообразных гиромоторов. Есть среди них миниатюрные — величиной с наперсток, а есть и гиганты — величиной с трехлитровую банку. Но наиболее широко применяются гиромоторы, относящиеся к «золотой середине», размером с небольшое яблоко. Однако даже они имеют весьма массивные маховики. Чтобы раскрутить эти маховики до рабочих скоростей, требуется несколько минут, а для более крупных гиромоторов — десятки минут.

Но во многих случаях столь длительный период подготовки к работе гиромотора недопустим. Иногда требуется, чтобы маховик набирал рабочую скорость за десятки секунд, единицы секунд и даже доли секунды. Чтобы обеспечить время разгона маховика порядка десятков и единиц секунд, электродвигатели гиромоторов проектируют специальным образом и подключают к специальным источникам питания, у которых величина и частота питающего напряжения изменяются по оптимальным, заранее рассчитанным программам.

В тех случаях, когда время разгона маховика должно составлять 1 с и менее, электродвигатели не применяют, так как они не обеспечивают столь малого времени разгона. В этих случаях или возвращаются к старинным методам (разумеется, значительно усовершенствованным) — к шнуру (гибкой стальной ленте), струе сжатого газа, или прибегают к ультрановым устройствам — пороховым ускорителям.



КОМПАС БЕЗ МАГНИТА

ГЛАВА 4

...Проблема построения гирокомпаса явилась пробным камнем для точной механики, а ее успешное разрешение — триумфом союза техники и науки. Опираясь на опыт, полученный в работах по гирокомпасам, гироскопия достигла выдающихся успехов.

К. Магнус

Полярная звезда и «магнитные камни» указывают направление на север. Магнитный компас, веками служивший мореплавателям, побежден железом и электричеством. Идея гирокомпаса. Создание корабельного гирокомпаса. Наземные и подземные гирокомпасы. Курсовые гироприборы на самолете. Гирокомпас на спутнике

Где север?

Этот вопрос стар как мир. Его стали задавать себе люди, как только ими овладела «охота к перемене мест».

Например, в начале нашей эры суровые викинги, отправляясь на своих парусно-гребных судах в страну бриттов (англичан), определяли направление на север (а следовательно, и на запад) по звездам. Они умели находить на ночном небе одну звезду, которая в отличие от всех других звезд не перемещалась по небосклону. Вожди викингов знали тайну: если, опустив голову на грудь, поклониться этой звезде, то слева окажется страна бриттов, а справа — родные фиорды.

Позже эту звезду назвали Полярной, а дотошные ученые установили, что и она движется вокруг оси вращения Земли (оси мира), описывая в течение суток на небесной сфере окружность радиусом около 1° (на небесной сфере расстояния измеряются в угловых единицах, а

не в линейных). Но поскольку этот радиус невелик и Полярная звезда находится над Северным полюсом Земли совсем рядом с осью ее вращения, то для приближенной ориентации Полярную звезду вполне можно считать неподвижной.

Умели «разговаривать со звездами» и другие древние мореходы Земли — греки, финикийцы, египтяне. Однако звезды капризны: днем они «отдыхают» — становятся невидимыми, а ночью часто не желают «беседовать», закрываясь тучами или туманами. В таких случаях древние мореплаватели замедляли движение своих кораблей, давая желанную передышку гребцам, и старались плыть, не теряя из виду берегов. Однако со временем все упорнее стала распространяться молва, что некоторые монахи и капитаны имеют таинственные металлические продолговатые предметы, которые могут «видеть» Полярную звезду днем и ночью сквозь тучи и туман и даже сквозь глухие стены за́мков и монастырей. И обращение с тем предметом несложно. Нужно лишь, привязав один конец нити длиною в локоть к середине предмета, поднять его и дать возможность свободно покачаться. Успокоившись, предмет всегда одним и тем же концом укажет сторону, в которой находится Полярная звезда.

Пока древние европейцы дивились «чуду великому», народы Востока уже тысячу лет использовали его.

...Идут караваны по бескрайним гобийским пескам. Солнце закрыто желтой пеленой пыли. Меж горбами белого верблюда совершает путь через пустыню глиняный сосуд, в котором на пробке плавает в воде продолговатый кусок намагниченного железа, один конец которого выкрашен в черный цвет, а другой — в красный. Как бы ни повернулся верблюд, черный конец магнита всегда указывает на север... Этот древний магнитный компас помогал караванщикам отыскать путь в бескрайних песках пустыни.

Но вернемся в Европу. В Неаполе стоит памятник Флавио Джойе, который, по мнению итальянцев, в 1302 г. изобрел магнитный компас. Как это произошло на самом деле, никто не знает, но живет красивая легенда...

Давным-давно, когда город Амальфи стоял, как и Венеция, на берегу моря, жил в нем Флавио Джойя, ювелир и инкрустатор. Он был беден и молод и, конечно, любил черноглазую красавицу Анджелу, дочь богатого рыбака Доменико. Суровый Доменико считал людьми

второго сорта всех тех, кто не выходил в море на веслах или под парусами, не испытал себя в штормах и бурях. А Флавио Джойя как раз относился к этой категории людей, и естественно, Доменико не хотел иметь такого зятя. Но отказать претенденту на руку дочери Доменико решил дипломатично и поэтому поставил условие: Флавио должен хотя бы один раз ночью или в туман проплыть на лодке строго по прямой линии. Доменико считал свое условие невыполнимым, так как даже его товарищам, бывалым морякам, это не удавалось.

Но Флавио был не из тех, кто сдается. В его мастерской нашелся продолговатый магнитный камень, который он укрепил горизонтально на круглой плоской пробке. На верхнюю поверхность пробки он установил диск с делениями — получился чувствительный элемент магнитного компаса — картушка.

Чтобы картушка могла поворачиваться в горизонтальной плоскости, Флавио проткнул ее вертикальной осью с острыми концами, которые упирались в опоры, установленные в корпусе прибора — чашке. Однако из-за давления картушки на нижнюю опору возникал большой момент трения, который препятствовал вращению картушки и вызывал большие ошибки прибора. Тогда Флавио налил в чашку воды, пробка всплыла, давление на нижнюю опору снизилось, вращение картушки стало плавным и свободным. В одном месте на краю чашки Флавио провел тонкую черту, а всю окружность диска картушки разделил на 32 равные части, каждая часть называлась румбом.

Настал день испытаний. Флавио сел в лодку и установил свой прибор так, чтобы тонкая черта на чашке совпадала с продольной осью лодки. Картушка, покачавшись вокруг оси, остановилась в таком положении, что один конец продолговатого магнитного камня указывал на север. Флавио заметил румб, который установился против тонкой черты на чашке, и смело налег на весла. Его задача была уже нетрудной: нужно было вести лодку так, чтобы во все время движения против тонкой черты на чашке стоял бы один и тот же румб. Это означало, что лодка идет по прямой.

Дальнейшее течение событий ясно: Доменико усомнился в своей точке зрения на деление людей, а его друзья-моряки, получившие магнитный компас, шумно отпраздновали свадьбу Анджелы и Флавио.

С помощью магнитного компаса, устройство которого существенно не изменилось со времени Флавио Джойи, были сделаны большие географические открытия. Направляемые острием стрелки магнитного компаса, капитаны вели свои корветы, фрегаты и бригантины к благоухающим туберозой континентам, к зелено-желтым лагунам, к таинственным островам сокровищ...

Однако уже во времена Колумба знали, что не всегда можно верить магнитному компасу. Великий мореплаватель писал: «Существует лишь одно безошибочное корабельное исчисление — это астрономическое; счастлив тот, кто с ним знаком».

А вот Дик Сэнд, пятнадцатилетний капитан, к несчастью, еще не умел делать астрономических наблюдений и поэтому попал в опасную историю, захватывающе рассказанную Жюль Верном. В основе этой истории лежит ошибка магнитного компаса, обусловленная влиянием на него массивных железных предметов. Вот как описывает Жюль Верн возникновение этой ошибки.

«Мы уже упоминали, что лаг и компас были единственными приборами, которыми Дик Сэнд мог пользоваться для приблизительного определения пути, пройденного «Пилигримом».

Молодой капитан приказал бросать лаг каждые полчаса и записывать показания прибора.

В ночь с 13 на 14 февраля Дик вынужден был отдохнуть несколько часов. У штурвала его заменил старик Том.

...Около трех часов ночи со старым Томом, утомленным долгой вахтой, случилось что-то похожее на гипнотический сон.

...Он не заметил, что по палубе скользнула какая-то тень. Это был Негоро. Подкравшись к компасу, судовой кок подложил под него какой-то тяжелый предмет. ...Это был железный брусок, под влиянием которого показания компаса изменились. Вместо того чтобы указывать направление на магнитный полюс, которое лишь немного отличается от направления на истинный полюс, стрелка указывала теперь на северо-восток. Отклонение это достигало четырех румбов, то есть половины прямого угла.

Через мгновение Том очнулся. Он бросил взгляд на компас... Ему показалось — могло ли быть иначе? — что «Пилигрим» отклонился от курса. Том повернул штурвал и направил корабль прямо на восток... Так ему, по край-

ней мере, казалось. Но вследствие отклонения стрелки, о котором он, конечно, и не подозревал, курс корабля, измененный на четыре румба, лег теперь на юго-восток.

Таким образом, «Пилигрим», продолжая идти вперед с прежней скоростью, уклонился от заданного курса на 45°».

Со временем, поняв причину ошибок компаса, мореплаватели стали разрабатывать меры для их снижения и учета. Например, один из указов Петра I гласил: «Впредь на кораблях заменять железа около компаса медью и не ставить оного ближе 14 футов от компаса». Но железо — не единственная причина ошибок магнитного компаса.

Доминик Франсуа Араго (1786—1853), двадцатитрехлетний французский академик, автор фундаментального научного труда «Гром и молния», был одержим идеей найти связь между электричеством и магнетизмом. О существовании такой связи свидетельствовали его наблюдения над грозами на суше и на море. Араго настойчиво собирал и изучал факты воздействия гигантской электрической искры — молнии на металлические предметы. Были в его коллекции случаи и трагические, и комические, и кончившиеся благополучно.

...Английское судно «Дувр» 9 января 1748 г. попало в сильную грозу. Ударом молнии расщепило грот-мачту, опалило частично палубу, некоторые каюты, борта. Капитан Уэддел, сверив по звездам направление стрелок магнитных компасов, убедился, что все они перемагничены, все четыре. Лежавшие на палубе стальные и железные предметы оказались сильно намагниченными. Видимо, Уэддел был опытным капитаном, он знал «слабость» магнитных компасов, поэтому катастрофы не произошло. Однако Араго описывает ряд трагических случаев, когда капитаны продолжали верить стрелке магнитного компаса, перемагниченной молнией.

Итак, железо и электричество вызывают отклонение стрелки магнитного компаса и делают его показания ненадежными.

Шло время... Начиналась последняя треть XIX в. Готовясь к кровопролитным мировым войнам, флот одевался в сталь, насыщался приборами и системами, энергия к которым подводилась по многокилометровым жилам электрических проводов. В грозное оружие превращались «потаенные суда» — подводные лодки. Флот остро

нуждался в более надежном курсоуказателе, чем магнитный компас. Моряки мечтали об указателе курса, работа которого не зависела бы от капризов погоды и волнения моря, от видимости звезд и стали бортов. И такой прибор будет создан — им станет гироскопический компас. Но произойдет это еще не скоро — в новом, XX веке.

«Идея граничит с безумием»

Итак, магнитный компас в морском флоте уже не может полностью справиться с возложенными на него обязанностями. Моряки и ученые ищут новый принцип построения курсоуказывающего прибора. Один из этих принципов был предложен Л. Фуко в 1852 г. в его знаменитых докладах Парижской академии наук.

«Однако, — пишет один из крупных ученых-гироскопистов К. Магнус, — путь от демонстрационной модели до практически полезного прибора был сложным и полным препятствий. Если окинуть мысленным взором пройденный путь, то можно почувствовать захватывающую напряженность поиска, связанную с блестящими озарениями и глубокими заблуждениями, присущую лишь действительно великим открытиям.

Примером может служить проблема, связанная с идеей создания гироскопического компаса — компаса, не зависящего от магнитного поля Земли. Важность проблемы несомненна, но идея граничит с безумием, ведь задача в конечном счете состоит в том, чтобы выделить медленную, едва заметную скорость вращения Земли на фоне огромных, по сравнению с этим, скоростей вращения самого прибора, когда он установлен на корабле, плывущем в штормовом море. Разве не удивителен сам факт, что люди работают над подобным проектом, вкладывают в него свой труд и средства? Правда, преимущественно это люди далеких от техники профессий, взявшиеся за дело с энергией и мужеством дилетантов: психолог Н. Ах, священник Ван ден Бос, историк искусства Г. Аншютц-Кемпфе. Последнему удается достичь цели...».

Но рассскажем все по порядку. Прежде всего вспомним демонстрационный прибор Л. Фуко. Он представ-

лял собою вращающийся маховик с горизонтальной осью, установленный в кардановом подвесе. Поскольку маховик имел три степени свободы, то ось его вращения должна была сохранять неизменным положение в абсолютном пространстве, несмотря на любые движения основания, на котором установлен прибор. В частности, таким основанием могла быть палуба корабля. Следовательно, с помощью прибора Фуко можно было наблюдать отклонение продольной оси корабля от направления, неизменного в абсолютном пространстве, материализуемого осью вращения маховика. Но это была «не та информация». Морякам нужно было знать отклонение корабля не по отношению к неподвижному абсолютному пространству, а по отношению к каким-либо опорным направлениям, связанным с Землей, вращающейся в абсолютном пространстве.

Традиционно таким опорным направлением считалось направление на Северный полюс Земли. Это направление лежит в плоскости любого земного меридиана.

Итак, встала задача: как заставить ось вращения маховика гироскопа приходить в плоскость меридиана и продолжать удерживаться в этой плоскости, несмотря на любые угловые движения корабля.

Первое решение предложил сам Фуко. Помните, он доказал: если трехстепенный гироскоп лишить одной степени свободы, а оставшуюся свободной ось карданова кольца установить вертикально, то ось. вращения маховика сама придет в плоскость меридиана.

Произойдет это потому, что именно в плоскости меридиана лежит горизонтальная составляющая скорости вращения Земли $U\cos\varphi$.

Итак, если магнитный компас использует для своей работы магнитное поле Земли, то гироскопический компас использует эффект вращения Земли.

Идея гирокомпаса, предложенная Фуко, скоро нашла своих последователей среди ученых и инженеров. Уже через восемь лет после докладов Фуко, в 1860 г., французский физик Ж. Сир по схеме Фуко создал прибор, вполне удовлетворительно работавший на основании, неподвижном относительно Земли. Но когда прибор был установлен на палубе корабля, обнаружилось странное явление: ось перестала приходить в устойчивое положение, она совершала непрерывные хаотичные колеба-

ния в горизонтальной плоскости. Съем показаний с гирокомпаса был невозможен.

Довольно скоро была установлена причина этого явления: гирокомпас Фуко реагирует на угловую скорость того основания, на котором он установлен. Пока гирокомпас Фуко устанавливался на основании, неподвижном относительно Земли, все было хорошо. Но палуба корабля — основание, подвижное относительно Земли. Это основание испытывает бортовую и килевую качку корабля при волнении моря. Причем угловые скорости качки во много раз больше полезной угловой скорости ($U\cos\varphi$) Поэтому гирокомпас Фуко, реагируя на угловые скорости качки палубы корабля, давал неустойчивые показания. Попытки изолировать гирокомпас от угловых скоростей качки палубы, установив его в кардановом подвесе, обладавшем нижней маятниковостью (гирокомпасы Ж. Труве, М. Гопкинса, Э. Дюбуа), успеха не принесли.

Гирокомпас, построенный на основе гироскопа с двумя степенями свободы, оказался совершенно неработоспособным на подвижном основании.

Относительно хорошо переносил качку гироскоп с тремя степенями свободы, сохраняя неизменное направление оси вращения маховика в абсолютном пространстве, — это было известно многим ученым и инженерам. Но как «привязать» ось вращения маховика к плоскости земного меридиана, было неясно.

Счастливая мысль — специально вызвать прецессию оси вращения маховика, заставив ее прийти в плоскость меридиана, а затем, оставаясь в этой плоскости, вращаться вместе с ней в абсолютном пространстве — впервые пришла в голову голландскому священнику (!) Максиму Геррарду Ван ден Босу. В 1886 г. он получил патент по заявке, озаглавленной «Новый корабельный компас».

Предложение Ван ден Боса, как и все гениальное, было предельно просто. В трехстепенном гироскопе Фуко центр масс совпадал с точкой пересечения осей карданова подвеса и оси собственного вращения маховика. Ван ден Бос предложил опустить центр масс гироскопа несколько ниже оси внутреннего кольца карданова подвеса. В этом и состояло изобретение!

Работа маятникового гирокомпаса, установленного на экваторе Земли, показана на рис. 11. Гиромотор с не-

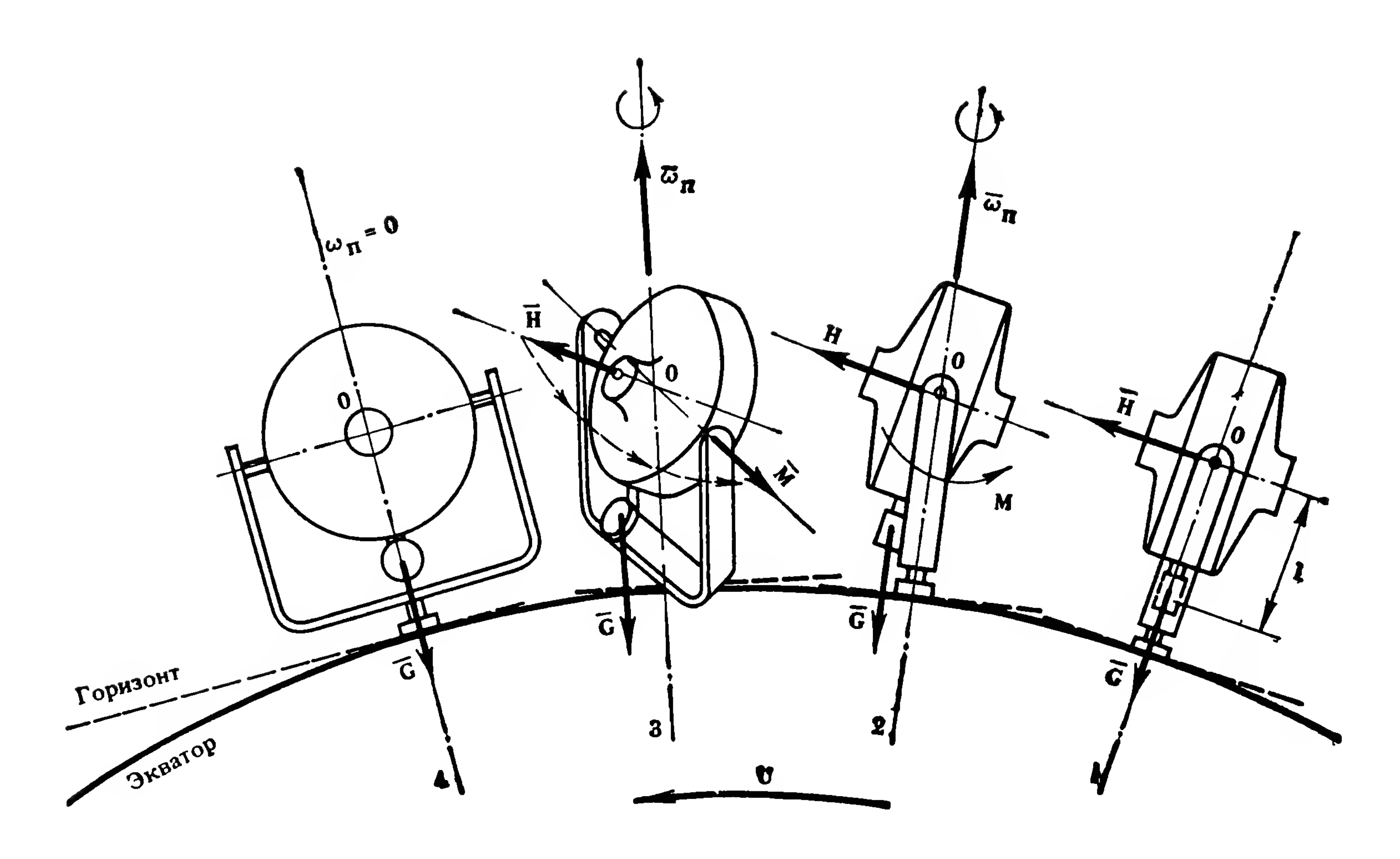


Рис. 11.
Схема, поясняющая принцип действия корабельного гирокомпаса

вращающимся маховиком превращается в физический маятник, который может качаться вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса. На неподвижном относительно Земли основании плечо l этого маятника силами тяготения устанавливается по вертикали, а перпендикулярная к нему ось вращения маховика располагается в горизонтальной плоскости.

После запуска гиромотора начинается «борьба» между маятником и гироскопом — каждый из них стремится проявить свои свойства: гироскоп — сохранить положение оси вращения неизменным в абсолютном пространстве, маятник — установить свое плечо по вертикали, меняющей положение в абсолютном пространстве из-за вращения Земли.

В результате этой «борьбы» плечо маятника отклоняется гироскопом от вертикали, а на гироскоп вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса действует момент M, создаваемый отклоненным маятником. Под действием этого момента гироскоп прецессирует, приводя ось вращения маховика в плоскость меридиана.

Предположим теперь, что гирокомпас установлен на корабле, спокойно стоящем у причала. Такой корабль представляет собой фактически «основание, неподвижное относительно Земли», поэтому ось вращения махови-

ка гирокомпаса отыщет направление плоскости меридиана и установится в этой плоскости.

Но вот корабль отправляется в рейс. Он может совершать любые развороты (эволюции), но ось вращения маховика гирокомпаса всегда останется направленной на север.

Чтобы определить положение продольной оси корабля по отношению к плоскости меридиана, в гирокомпасе, так же как и в магнитном компасе, может быть применен горизонтальный диск с делениями, укрепленный на оси наружного кольца карданова подвеса гироскопа. Прибор на палубе устанавливается так, чтобы тонкая черта, нанесенная на корпус прибора, была параллельна продольной оси корабля, диск с делениями (шкала) стабилизируется гироскопом. Поэтому он не участвует в угловых движениях корабля, его диаметр С — Ю (север—юг) всегда совпадает с плоскостью меридиана, а диаметр З—В (запад—восток) — с плоскостью параллели. Обычно шкала имеет 360 делений по числу градусов в окружности. Отсчет начинается от отметки «0», которая совпадает с буквой «С», и ведется по ходу часовой стрелки. Таким образом, если корабль идет точно на север, то его продольная ось, обозначенная тонкой чертой на корпусе прибора, параллельна оси вращения маховика и диаметру С—Ю шкалы гирокомпаса. Другими словами, тонкая черта стоит против отметки «С» («0») на шкале прибора, корабль идет курсом «0».

Если корабль изменил курс и идет теперь точно на северо-восток, то тонкая черта на корпусе прибора, повернувшись вместе с кораблем, установится против отметки шкалы 45°. Это и будет курс корабля — 45°.

В современных гирокомпасах вместо такой шкалы применяют электрические измерители углов рассогласования между продольной осью корабля и осью вращения маховика — так называемые вращающиеся трансформаторы, которые позволяют передавать показания гирокомпаса к различным потребителям.

«Эта вещь наделает много шума»

Любопытна дальнейшая судьба трехстепенного гирокомпаса. Патент Ван ден Боса был куплен крупным немецким предпринима-

телем Вернером фон Сименсом. Он писал об этом в 1888 г. своему брату: «Сегодня я заключил договор с двумя голландцами об осуществлении их изобретения — компаса без магнита. Он состоит из вращающихся дисков, которые направляют плавающий в воде корпус точно на истинный полюс Земли. Естественно, что он совершенно не зависит от воздействия железа и от магнитных помех. Эта вещь наделает много шума».

Быстро был создан опытный образец гирокомпаса, испытания которого при волнении моря не дали положительных результатов. Спустя 8 месяцев Сименс писал: «Ротационный компас также оказался иллюзией, в которую мы были введены благодаря легкомысленности господина Лента. Последний, будучи экспертом по этому делу, тем не менее не был знаком со многими явлениями, и благодаря его безосновательному энтузиазму мы и позволили втянуть себя в это дело».

Сименс потерпел неудачу потому, что сотрудникам его фирмы удалось решить лишь одну из трех основных проблем, стоявших на пути создания трехстепенного гирокомпаса. Первая проблема — обеспечение высоких и постоянных скоростей вращения маховика гироскопа (создание «сердца» прибора — гиромотора). Вторая — подвес маховика, обеспечивающий ему две степени свободы, но при этом не создающий вредных моментов (трения, тяжения и др.), уводящих через вредную прецессию ось вращения маховика из плоскости меридиана. Третья проблема — незнание причин основных ошибок гирокомпаса, что не позволило правильно выбрать его параметры, или, как стали говорить позднее, осуществить его настройку.

Сименс решил лишь вторую проблему, опустив чувствительный элемент гирокомпаса в сосуд с водой и тем устранив вредные моменты сухого трения. Правда, поплавковый принцип подвеса гироузла использовался и раньше В. Томсоном (лордом Кельвином), и вообще он может показаться естественным, если учесть, что поплавок применялся еще в магнитных компасах. Работы над схемой гирокомпаса Ван ден Боса приостановились.

...Новый, 1821 г. экипажи русских шлюпов «Восток» и «Мирный» встречали в высоких южных широтах. 21 января 1821 г. русские моряки первыми увидели неизвестные берега — они открыли Антарктиду, шестую часть света. Но последняя ли она, может быть, сущест-

вует еще и седьмая часть света? На Земле осталось лишь одно «белое пятно» — зона Северного полюса. И туда устремились отважные полярные исследователи. Сначала пытались подойти к Северному полюсу на кораблях, но неудачно: тонули корабли, раздавленные льдами, гибли люди. И тогда возникла идея добраться до полюса на подводной лодке. Но как найти и выдерживать направление движения на север под льдами, в кромешной тьме холодных вод Ледовитого океана? За решение этой проблемы берется Герман Аншютц-Кемпфе (1872—1931).

С юношеских лет Герман вызывал удивление: сначала он изучал медицину, потом историю искусств (ему даже была присвоена степень доктора философии за работу о венецианских художниках XVI в.), затем его охватывает полярная страсть — он, как и многие его современники, хочет достичь Северного полюса. Герман участвовал в двух полярных экспедициях, но цели не добился. И тогда он решает организовать собственную экспедицию на подводной лодке. Дело за «небольшим» — нужно лишь создать курсоуказывающий прибор.

Аншютц понимает, что для его цели не годятся ни магнитный, ни гироскопические компасы, так как в высоких полярных широтах они «еле живы» — теряют свои направляющие силы. Стрелка магнитного компаса стремится установиться вдоль магнитных силовых линий «большого магнита» — Земли. А эти силовые линии в зоне Северного полюса опускаются на поверхность Земли почти под прямым углом. Поэтому стрелка магнитного компаса в высоких полярных широтах стремится встать под прямым углом к поверхности Земли, а в горизонтальной плоскости направляющей силы практически не имеет. Гироскопические компасы (Л. Фуко и Ван ден Боса) используют для своей работы горизонтальную составляющую угловой скорости вращения Земли $U\cos\varphi$. Но в высоких полярных широтах $\varphi\approx 90°$, $\cos\varphi\approx 0$ и $U\cos\varphi\approx U\cdot 0\approx 0$, то есть исчезает причина, порождающая направляющую силу гироскопических компасов

Аншютц решает создать новый тип гироскопического курсового прибора — «азимутальный волчок». Первые опыты с макетом прибора были проведены в 1900 г. В 1904 г. Аншютц патентует законченную конструкцию прибора. Прибор Аншютца очень напоминал по схеме трехстепенной гироскоп Л. Фуко. Но гироскоп Фуко сохранял

неизменной ось вращения маховика в абсолютном пространстве. Как же собирался Аншютц «привязать» ось вращения маховика своего прибора к плоскости меридиана? Очень просто. Он предполагал устанавливать на внутреннее кольцо карданова подвеса грузы определенной массы (грузиковая коррекция). Эти грузы смещали центр масс гиромотора вдоль оси вращения маховика. В результате вокруг оси внутреннего кольца действовал момент, который вызывал прецессию гироскопа вокруг вертикальной оси наружного кольца. Искусство пользования таким прибором состояло в том, что нужно было, подбирая величину момента, создать такую скорость прецессии, которая в точности равнялась бы скорости вращения плоскости меридиана в абсолютном пространстве.

Хотя идея была совершенно правильная, создать удовлетворительно работающий прибор не удалось: слаба была еще техника, неясны были и основные причины ошибок прибора. Однако именно этот прибор следует считать родоначальником современных гироскопических курсоуказывающих приборов, которые решили проблему полярной навигации. В морском флоте они получили название гироазимутов, а в авиации — гирополукомпасов, или гироскопов направления.

Ну а что же Герман Аншютц? Пал духом? Нет! Он понимает, что две заоблачные вершины — создать гироскопический курсоуказывающий прибор и покорить Северный полюс — ему не взять. Он отказывается от организации полярной экспедиции и целиком отдается новой страсти — созданию корабельного гироскопического компаса, где его ждет успех.

Трижды прав Галилео Галилей, сказавший: «Ничто великое в мире не совершалось без страсти».

Аншютц ставит дело широко. В городе Киле в 1905 г. он основывает фирму «Аншютц и К°», которая будет заниматься разработкой «меридионального гироскопа». Для работы над проблемой Аншютц приглашает молодых талантливых инженеров и среди них своего двоюродного брата Макса Шулера (1882—1972). За основу решено взять схему гирокомпаса Ван ден Боса. Шулер предлагает прежде всего решить проблему «сердца» прибора — проблему гиромотора. Задача решается применением быстроходного асинхронного двигателя.

Но здесь возникает новое неожиданное препятствие. В 1906 г. известный ученый-механик О. Мартиенссен пу-

бликует теоретические результаты своих исследований маятникового трехстепенного гирокомпаса. Выводы неутешительны: на неподвижном основании гирокомпас может работать безупречно, но для использования «на движущемся экипаже подобный компас непригоден».

Основание для этого вывода весьма серьезно: экипажи при начале движения, при маневрировании, при торможении движутся с ускорениями. Ускорения порождают силы инерции, которые, создавая вредные моменты, «уводят» ось вращения маховика из плоскости меридиана, то есть возникает ошибка гирокомпаса, которая называется **баллистической девиацией.** Когда движение экипажа с ускорением прекратится, то исчезнет и сила инерции, но возникнет направляющий момент гирокомпаса, который вызовет прецессию гироскопа к положению равновесия, то есть в сторону плоскости меридиана. Однако гироскоп займет положение равновесия не сразу, а совершив несколько колебаний около этого положения.

В этом явлении Мартиенссен увидел большую опасность, так как, по его мнению, таким прибором не смог бы пользоваться рулевой, ибо «нельзя будет отличить собственные колебания компаса от движений судна».

Пессимизм Мартиенссена не поколебал уверенности Аншютца в успехе его дела: Аншютц, видимо, пока интуитивно не считал баллистические девиации непреодолимым препятствием. По этой причине возник бурный диспут, в ходе которого Мартиенссен попросил Аншютца более четко обосновать свои позиции и опубликовать это обоснование. Почти два года понадобилось Аншютцу, чтобы доказать свою правоту. За это время Шулер провел более глубокие теоретические исследования схемы маятникового гирокомпаса, а инженеры фирмы «Аншютц» на основании его рекомендаций создали первый вариант прибора. Кроме баллистической ошибки, открытой Мартиенссеном, Шулер обнаружил еще одну ошибку, названную позднее **скоростной ошибкой (девиацией).** Суть ее заключается в следующем. Представим себе корабль, который плывет на север, огибая шарообразную Землю по меридиану. В результате корпус корабля поворачивается вокруг своей поперечной оси в абсолютном пространстве с угловой скоростью $\omega = \frac{V_C}{R}$, где V_C — скорость движения корабля в северном направле-

нии; R — радиус Земли. Вектор этой угловой скорости совпадает с направлением запад—восток. При одновременном вращении корабля с угловыми скоростями $U \cos\varphi$ и $\frac{V_C}{R}$ ось вращения маховика будет стремиться установиться по направлению равнодействующей этих угловых скоростей, отклоненной от плоскости меридиана на какой-то угол δ_C. Вот этот угол δ_C и будет скоростной ошибкой гирокомпаса, определяемой по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_C = V_C / R\, U \cos\varphi.$$

Итак, известны уже две методические ошибки маятникового гирокомпаса — баллистическая и скоростная. Понимая физическую сущность этих ошибок, Шулер предлагает способы их значительного снижения.

Лабораторные и морские испытания первого варианта гирокомпаса, проведенные специалистами фирмы «Аншютц», подтвердили высокую эффективность предложений Шулера. В техническом отношении этот вариант гирокомпаса был для своего времени весьма совершенным: высокоскоростной асинхронный гиромотор, гидростатическая (с помощью поплавка, плавающего в ртути) разгрузка опор, сводящая к незначительным величинам вредные моменты трения, оригинальная система успокоения колебаний чувствительного элемента (с помощью струй воздуха, создаваемых вращающимся маховиком гиромотора), устройства для компенсации скоростных и баллистических ошибок и многое другое обеспечили успех испытаний первого гирокомпаса. Но, как мы увидим в дальнейшем, успех этот был... случаен. И причиной тому было ошибочное мнение теперь уже авторитетного ученого Макса Шулера о том, что периодические возмущения, возникающие при качке корабля, не вызывают погрешностей гирокомпаса. Шулер в данном случае рассуждал слишком прямолинейно: поскольку в течение первого полупериода качки сила инерции действует на маятник в одном направлении, а во второй полупериод — в противоположном, то в целом за период качки результирующего действия сил инерции на гирокомпас не будет. Эта ошибка дорого обошлась фирме «Аншютц», но, как сказал Гёте, «кто ищет истины — не чужд и заблужденья».

Ошибка Шулера вскроется позже, а пока окрыленный успехом глава фирмы Аншютц решается сделать до-

клад Германскому обществу кораблестроителей о результатах разработки гирокомпаса, чтобы, с одной стороны, публично ответить Мартиенссену, а с другой — создать рекламу своему детищу и получить выгодные заказы. В ноябре 1908 г. доклад состоялся и прошел с большим успехом. Решено было создать официальную комиссию из представителей заинтересованных фирм и провести испытания гирокомпаса фирмы «Аншютц» на корабле, составлявшем гордость германского флота — линкоре «Дойчланд». И снова счастливая случайность: и эти испытания гирокомпаса прошли успешно. В результате гирокомпас «Аншютц» был принят на вооружение германского и английского флотов, началось серийное производство приборов.

Однако вскоре, по мере того как росло число кораблей, оснащенных гирокомпасами «Аншютц», в правление фирмы стали все чаще поступать рекламации, в которых указывалось, что прибор имеет слишком большие ошибки при бортовой качке корабля.

Аксель Иванович Берг, академик, крупнейший советский специалист в области радиотехники, в молодости был морским офицером и плавал на подводной лодке. Он вспоминал, что плавать было очень трудно, так как ошибки гирокомпаса при качке достигали 20°, а другого курсового прибора на подлодке не было. Правда, русский флот в то время был оснащен гирокомпасами американской фирмы «Сперри», которая несколько позже начала производство маятниковых гирокомпасов, но повторила основные ошибки фирмы «Аншютц».

За чрезмерно большие ошибки, которые имел гирокомпас Аншютца при сильном волнении моря, он был метко назван «компасом для хорошей погоды» и снят с вооружения.

Неудачи подавляют слабых

Для фирмы «Аншютц» наступили черные дни. Но неудачи подавляют лишь слабых, сильных они закаляют, зовут к борьбе и победе.

С удвоенной энергией Шулер берется за более глубокое исследование маятникового гирокомпаса. Уже в 1910 г. он окончательно «расправляется» с баллистиче-

скими девиациями, открыв условие невозмущаемости гирокомпаса при движении корабля с ускорением. Оказалось: если выбрать параметры гирокомпаса так, что период недемпфированных колебаний оси вращения маховика около плоскости меридиана составит 84,4 мин., то баллистические девиации не возникают. Это открытие сыграло очень важную роль в совершенствовании и развитии морских гирокомпасов, а затем и в развитии инерциальной навигации, о чем речь еще впереди.

Период колебаний какой-либо механической системы, равный 84,4 мин., называется периодом Шулера. Колебательные системы, обладающие периодом Шулера, не реагируют на ускоренное движение основания, на котором они установлены. Однако выполнить это условие для простейших устройств типа маятника или уровня затруднительно, поэтому период Шулера реализуется лишь в гироскопических приборах.

Итак, с баллистическими и скоростными девиациями все ясно, они практически обезврежены. Но вот качка... Специалисты фирмы проводят тщательные испытания гирокомпаса на корабле в условиях сильного волнения моря и устанавливают:

— если корабль идет одним из кардинальных курсов, то есть в направлениях север—юг, восток—запад, то гирокомпас ошибок не имеет;

— если корабль идет одним из интеркардинальных курсов, то есть в направлениях северо-восток — юго-запад, северо-запад — юго-восток, то ошибки гирокомпаса максимальны и достигают 10...20°.

Это была существенная подсказка, позволившая Шулеру установить причины ошибок гирокомпаса при качке, а затем и предложить пути их устранения.

Эффект, открытый Шулером, оригинален и проявляется во многих гироскопических приборах, имеющих неуравновешенные узлы или конечную, неравную в разных направлениях жесткость конструкции и работающих в условиях периодических возмущений (качка, вибрация).

Механизм возникновения этого эффекта непрост, но попробуем дать о нем хотя бы общее представление.

В основе интеркардинальной ошибки гирокомпаса лежат два явления. Первое — отсутствие гироскопической стабилизации маятника гирокомпаса вокруг оси вращения маховика. В результате этого силы инерции, порожденные качкой корабля, раскачивают маятник ги-

рокомпаса вокруг этой оси. Второе — в промежутки времени (полупериоды качки), когда маятник отклонен относительно вертикали, силы инерции создают моменты сразу вокруг обеих осей карданова подвеса.

Поскольку предполагалось, что «увод» чувствительного элемента гирокомпаса из плоскости меридиана дают моменты, действующие вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса, то в первую очередь изучили эти моменты. Оказалось, что за целый период качки они результирующего «увода» не дают, поскольку в первый полупериод качки «уводят» чувствительный элемент в одну сторону, а во второй полупериод — в противоположную. Именно эти моменты имел в виду Шулер, когда ошибочно утверждал, что качка для маятникового гирокомпаса нестрашна.

Иное дело моменты, действующие вокруг оси наружного кольца карданова подвеса. Детальное их изучение показало, что направление действия этих моментов одинаково в оба полупериода качки. Следовательно, за целый период качки на гироскоп вокруг оси наружного кольца действует постоянный по направлению момент. Вот в этом и был корень зла. Но на этот факт Шулер не обратил сразу внимания.

Дальше все просто: момент, действующий вокруг оси наружного кольца, вызывает прецессию гироскопа вокруг оси внутреннего кольца и как результат этой прецессии — отклонение плеча маятника от вертикали. Отклоненный от вертикали маятник создает момент вокруг оси внутреннего кольца, который вызывает прецессию гироскопа вокруг оси наружного кольца, уводящую чувствительный элемент гирокомпаса из плоскости меридиана. Вот так возникает ошибка гирокомпаса, порожденная качкой корабля.

Как только причины ошибки гирокомпаса при качке стали ясны, нашлись и радикальные меры для их устранения. Поскольку причина ошибки состояла в том, что при качке корабля плечо маятника отклонялось от вертикали, то был предложен способ удержания (стабилизации) плеча маятника на вертикали путем применения дополнительных гироскопов. Так фирма «Аншютц» пришла сначала к трехгироскопной схеме гирокомпаса (1913 г.), а потом к более совершенной двухгироскопной (1925 г.). О последней следует сказать особо, так как она с успехом применяется и в настоящее время.

Два гироскопа, связанных между собою системой рычагов и пружин, были установлены внутри шара, полностью погруженного в электропроводящую жидкость, через которую к гиромоторам подводилась электрическая энергия. Шар, являвшийся чувствительным элементом гирокомпаса, в свою очередь был помещен в сферическую оболочку — следящую сферу, которая приводилась в движение специальным двигателем и повторяла (отслеживала) все движения шара. Электрическое устройство для отсчета курсовых углов было установлено на оси следящей сферы и позволяло размножать и дистанционно передавать показания гирокомпаса различным потребителям. Введение следящей сферы позволило свести к минимуму вредные моменты, действующие на чувствительный элемент (шар), и тем значительно повысить точность прибора. Чтобы шар не касался стенок следящей сферы, по совету А. Эйнштейна было применено центрирование шара с помощью магнитного поля («магнитное дутье»). Это позволило вообще исключить механический контакт между шаром и следящей сферой. Надо сказать, что Эйнштейн был многие годы дружен с Аншютцем, сотрудничал с его фирмой, следил за развитием гироскопической техники.

Итак, понадобилось около 40 лет напряженной работы выдающихся людей, чтобы создать надежно работающий гирокомпас, который получил название «новый Аншютц» и начал успешно использоваться на кораблях многих стран мира.

В процессе работы над гирокомпасом были получены не только важные технические, но и фундаментальные научно-теоретические результаты. Трудами выдающихся ученых — В. Томсона (лорда Кельвина), А. Феппля, М. Шулера, Ф. Клейна, А. Зоммерфельда были заложены основы новой науки — прикладной теории гироскопов, которая в отличие от классических задач изучала движение не одного тела с неподвижной точкой, а целой системы тел, находящихся под действием самых разнообразных возмущающих сил.

Начало советской школе теории гироскопов положил знаменитый ученый-кораблестроитель, математик и механик академик А. Н. Крылов.

В 1932 г. вышла в свет его книга «Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений» (в соавторстве с Ю. А. Крутковым), в которой приводилось

систематическое изложение известных к тому времени результатов исследований в области гироскопической техники и результаты важных оригинальных работ автора, посвященных развитию теории гирокомпаса и других гироскопических приборов.

Труды Крылова оказали решающее влияние на формирование воззрений многих специалистов в области гироскопии и в целом на развитие теории и производства гироскопических приборов в СССР.

В середине 30-х гг. под научно-техническим руководством А. Н. Крылова и Н. Н. Острякова в СССР началось серийное производство морских гирокомпасов, которые получили название «Курс-1».

Тем самым был завершен большой труд по созданию отечественного гирокомпаса, начатый еще в канун Октябрьской революции группой молодых морских офицеров (гирокласс), изучавших теорию и практику гироскопии под руководством Б. И. Кудревича, впоследствии известного советского ученого в области гирокомпасов и систем гироскопической стабилизации.

В настоящее время все морские суда Советского Союза оснащены различными типами гирокомпасов. В частности, широкое распространение нашла гироскопическая курсовая система «Вега» (рис. 12). Она содержит не только центральный гироскопический прибор, но и обслуживающую его аппаратуру (пускатель, преобразователь, прибор питания, корректор-транслятор) и устройства для размножения его показаний — разветвительную коробку, подающую сигналы о курсе корабля различным потребителям: авторулевому, радиолокатору, радиопеленгатору, курсографу, репитерам (повторителям).

Особенностью центрального гироскопического прибора курсовой системы «Вега» является устройство исключения влияния маятника на гироскоп, что позволяет эксплуатировать центральный гироприбор в двух режимах — гирокомпаса и гироазимута.

Если корабль плывет постоянным курсом, а море спокойно, то гироприбор работает в режиме маятникового гирокомпаса. Если корабль маневрирует или море штормит, то, отключая маятник, гироприбор переводят в режим хранителя направления (гироазимута), ошибки которого в условиях качки корабля значительно меньше, чем маятникового гирокомпаса.

Курсовая система «Вега» устанавливается на тран-

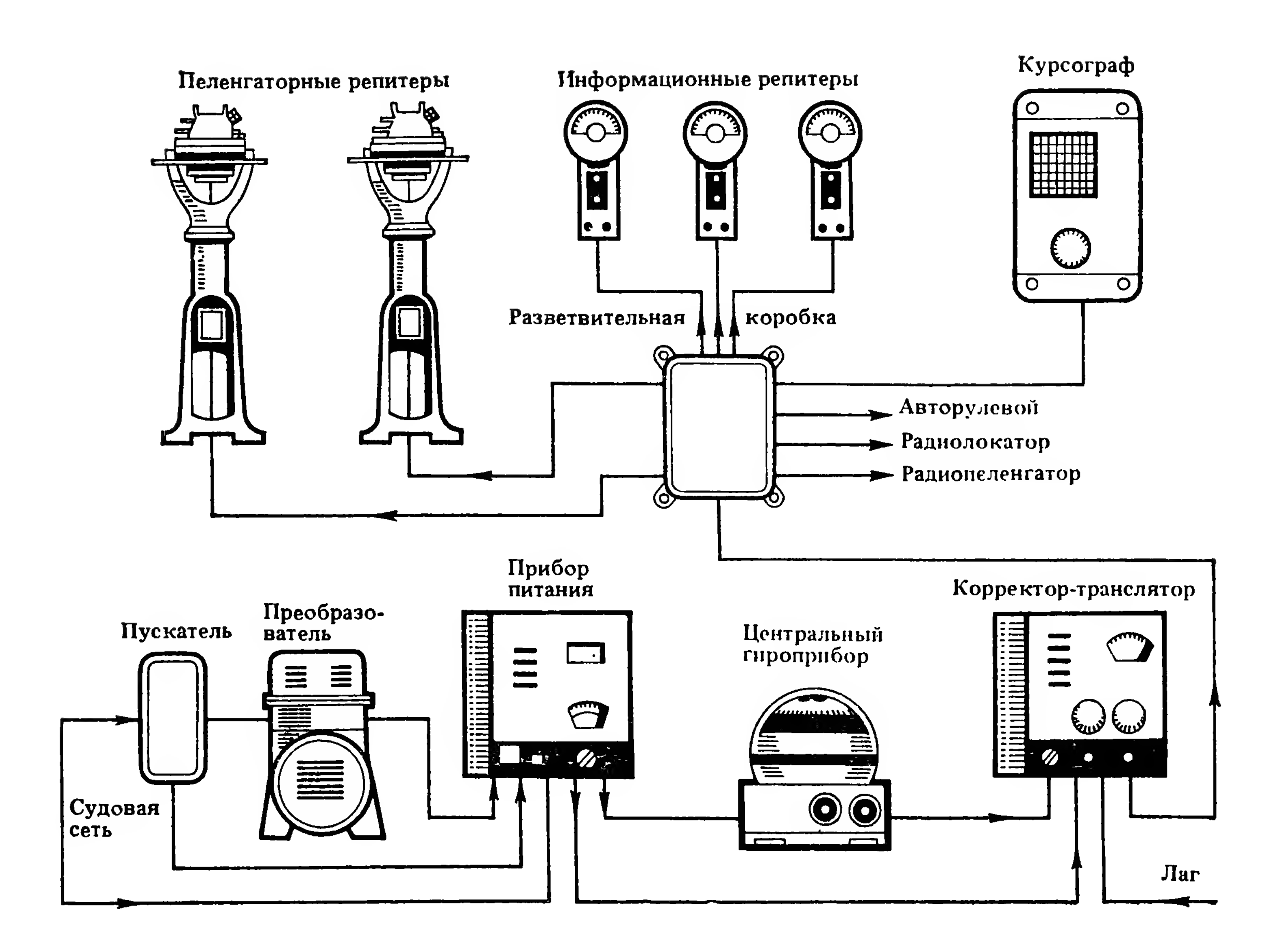


Рис. 12.
Типовой комплект гироазимуткомпаса «Вега»

спортных судах и судах промыслового флота. Ее ошибка курсоуказания (в зависимости от условий плавания) 0,8...1,5°. Однако во многих случаях нужны более точные курсовые системы, поэтому их совершенствование продолжается,

Гирокомпас сходит на берег

Почти в каждой стране есть город, жители которого любят рассказывать о себе шутливые истории. В Болгарии это Габрово, в Ирландии — Керри.

«Растущий поток пассажиров и грузов между Англией и континентальной Европой все настоятельнее требует более быстрого и надежного транспорта, чем существующее ныне паромное и воздушное сообщение». Прочитав эту информацию в газете, два жителя города Керри решили заняться проблемой, а заодно и немного подзаработать. Они явились к премьер-министру Англии и за-

явили, что могут прорыть тоннель под Ла-Маншем за 500 фунтов стерлингов.

— А как вы думаете это сделать? — спросил премьер.

— Очень просто. Один из нас начнет копать с английской стороны, другой — с французской.

— А если вы не встретитесь под проливом?

— Тогда вы, премьер-министр, получите два тоннеля за ту же цену!

Премьер ответил отказом и прогадал: по подсчетам специалистов сооружение тоннеля под Ла-Маншем обойдется около 2 млрд. фунтов стерлингов.

Шутки шутками, а как все-таки проложить тоннель, не отклонившись от заданного направления? Предположим, что предприимчивые землекопы из города Керри начали копать тоннель в самой узкой части пролива Ла-Манш, называемой Па-де-Кале (в переводе — Шаг великана). Ширина пролива L в этом месте составляет около 32 км.

Чтобы землекопы встретились под проливом, они должны выйти к точке встречи с боковым отклонением Δ не более 10 м. Теперь нетрудно рассчитать допустимый угол отклонения α действительной осевой линии каждого полутоннеля от идеального направления тоннеля, определенного при его проектировании.

$$\operatorname{tg}\alpha \approx \alpha \approx \frac{\Delta}{0{,}5L} \approx \frac{10\text{м}}{0{,}5\cdot 32\,000\text{м}} \approx 0{,}6\cdot 10^{-3}\ \text{рад} \approx 0{,}04^\circ.$$

Таким образом, действительное направление проходки тоннеля должно отличаться от заданного на угол, не превышающий 0,04°. Как обеспечить это требование под слоем земли и под слоем воды? Наверное, так же, как решил подобную задачу Флавио Джойя, проплыв на лодке в туман строго по прямой линии, то есть создать базовое направление с помощью компаса. Однако магнитный компас для этой цели не годится — он никогда не давал показаний с ошибкой менее 0,5°. Здесь нужен более точный прибор — специальный наземный гироскопический компас.

Нужно сказать, что прокладка тоннелей — не единственная задача точного определения направлений, неподвижных относительно Земли. Есть еще множество аналогичных задач, некоторые из них поясняются рис. 13. Особенно острыми эти задачи стали в первые послевоенные годы. Сначала их попытались решать с помощью ко-

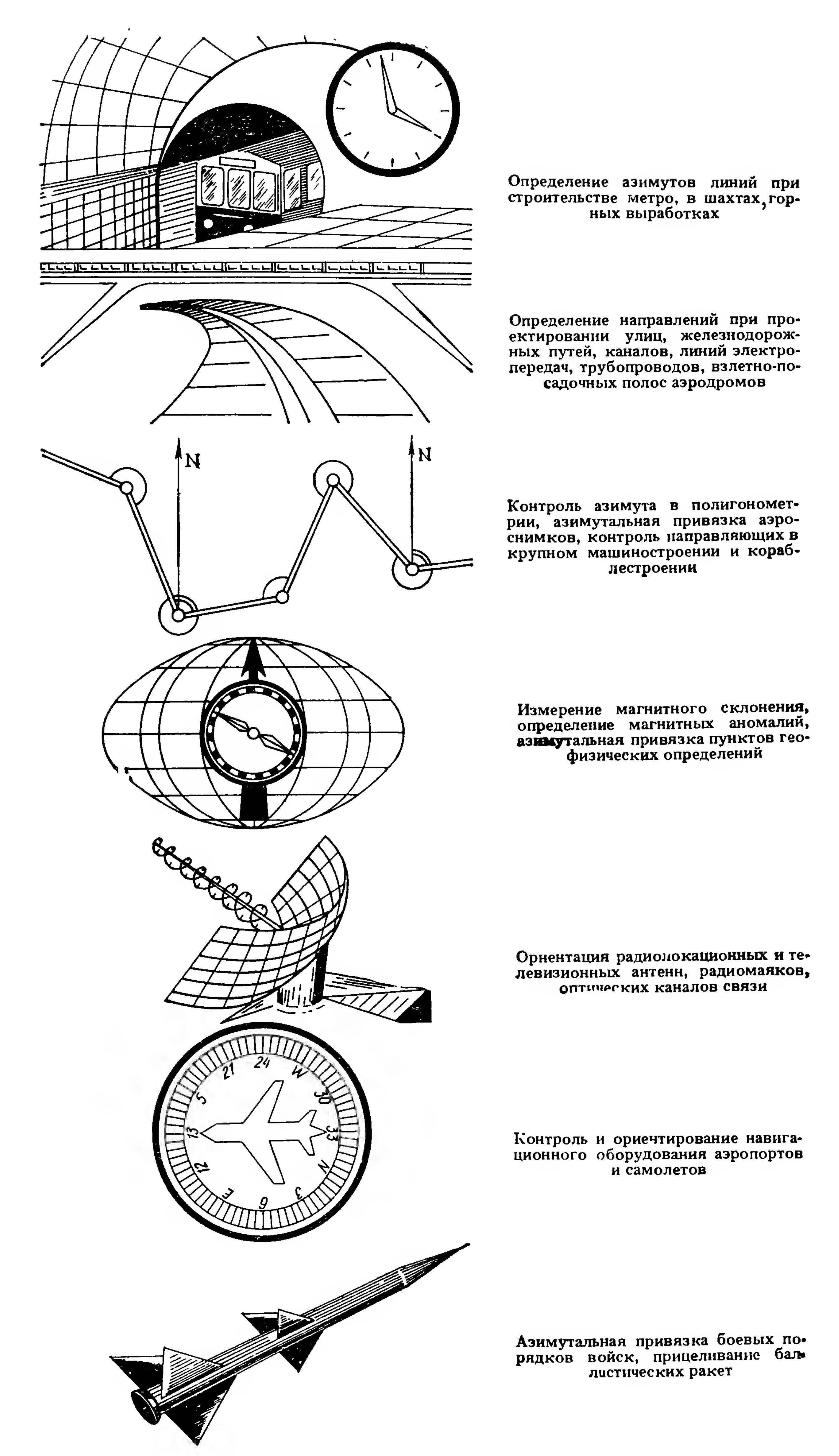


Рис. 13.
Примеры применения наземного гирокомпаса

рабельных гирокомпасов. Однако положительных результатов не получили. Эти приборы, установленные на земле, необходимой точности не обеспечивали. Пришлось разрабатывать специальные схемы и конструкции наземных гирокомпасов.

Основная особенность наземных гирокомпасов — высокая точность; допустимые ошибки составляют: для строительства сравнительно коротких тоннелей — сотые доли градуса, для прицеливания баллистических ракет— тысячные доли градуса.

В настоящее время наиболее широкое распространение получила схема наземного гирокомпаса, в которой чувствительным элементом является гиромотор с горизонтальной осью вращения маховика, подвешенный на струне как маятник. Во время работы гирокомпаса ось вращения маховика совершает медленные, очень слабо затухающие колебания относительно плоскости меридиана. Чтобы уменьшить размах колебаний и тем сократить время поиска плоскости меридиана, чувствительный элемент гирокомпаса предварительно с помощью магнитного компаса грубо выставляют в плоскость меридиана. Точное положение плоскости меридиана определяют вычислением по точкам реверсии, то есть по координатам тех точек, где чувствительный элемент гирокомпаса на мгновение останавливается, а затем начинает двигаться в обратном направлении. Чтобы исключить влияние на точность работы гирокомпаса упругого момента, возникающего от закрутки струны при колебаниях чувствительного элемента, в приборе применена специальная, очень точная следящая система, поворачивающая узел крепления струны вслед за движением чувствительного элемента. В приборе предусмотрены средства защиты и от других возмущающих моментов, причинами которых могут быть: нагрев конструкции, магнитные поля, малейшие сотрясения основания и многие другие. Подвес гиромотора на струне не очень удобен, так как для исключения вредных моментов струна должна быть длинной и тонкой, а такие струны легко рвутся. Поэтому в наземных гирокомпасах применяют сложные арретирующие (фиксирующие) устройства, жестко соединяющие гиромотор с корпусом прибора на время хранения и транспортировки прибора.

Разрабатываются наземные гирокомпасы и с другими видами подвеса чувствительного элемента: магнитными,

гидростатическими, газовыми и др., но все эти виды подвесов пока уступают струнному.

Таким образом, читатель, видимо, почувствовал, что наземный гирокомпас — сложное, громоздкое и, следовательно, дорогое устройство, работающее по специальной методике и требующее для эксплуатации квалифицированного обслуживающего персонала. Все это говорит о том, что наземные гирокомпасы нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Гироскоп поднимается в небо

Пока на море велась ожесточенная борьба с ошибками магнитного компаса, в воздух начали подниматься первые самолеты. Предвидя большое будущее авиации, А. Ф. Можайский указал на необходимость разработки и установки на самолетах основных навигационных приборов — указателя скорости, указателя высоты и единственного известного тогда курсоуказателя — магнитного компаса. Разработкой магнитного компаса для самолета А. Ф. Можайского занимался русский морской офицер И. П. де-Коллонг, впоследствии академик. Впервые магнитный компас испытывался на «русском чуде» — самолете-гиганте «Илья Муромец». Испытания прошли в целом успешно. Начиналась эра самолетовождения по приборам, без видимости земных ориентиров — «слепые полеты».

Однако со временем и в авиации гироскопические приборы заметно потеснили магнитный компас. «Атаку» начал **гироскопический указатель поворота.**

Дело в том, что точность показаний магнитного компаса на самолете в значительной степени зависела от условий полета, а гироскопический компас только еще разрабатывался. И тогда возникла идея, нельзя ли вести самолет прямолинейно, используя для контроля движения не курсовой прибор, определяющий угол отклонения самолета от курса, а прибор, дающий оперативную информацию о наличии угловой скорости отклонения самолета от курса. Идея оказалась правильной. В 1917 г. русские летчики А. Н. Журавченко и Г. Н. Алехнович совершили на самолете «Илья Муромец» слепой полет, выдер живая заданный прямолинейный курс по гироскопическо-

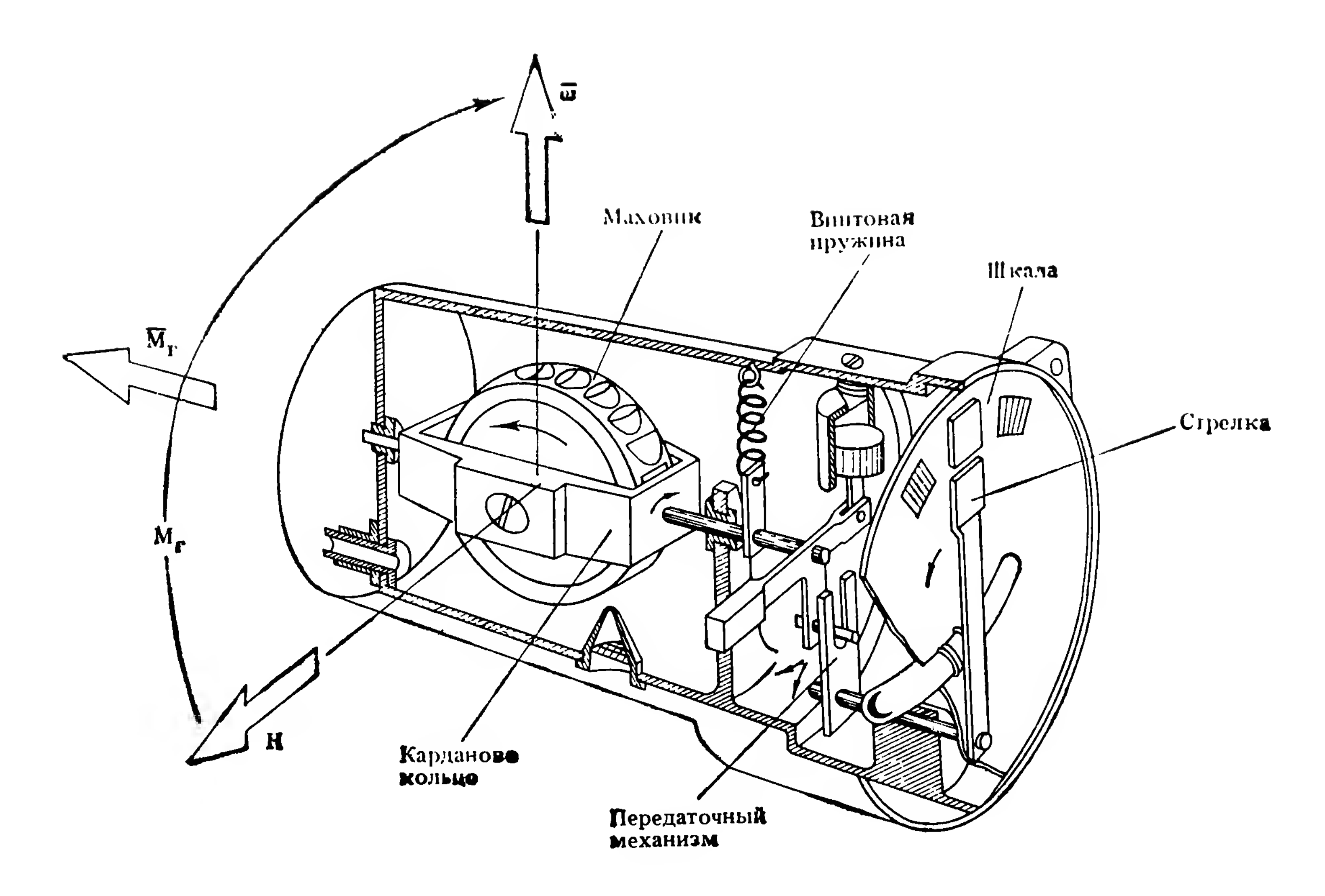


Рис. 14.
Указатель поворота фирмы «Пионер»

му указателю поворотов. Этот прибор был разработан П. П. Шиловским, известным русским изобретателем в области гироскопических приборов и устройств.

Один из первых гироскопических указателей поворота был создан американской фирмой «Пионер» (рис. 14). Устройство прибора несложно, в основе его лежат свойства гироскопа с двумя степенями свободы. Маховик гироскопа приводился во вращение струей воздуха и мог поворачиваться вокруг оси карданова кольца. Поворот маховика ограничивался винтовой пружиной и через специальный механизм передавался стрелке прибора. Указатель поворота устанавливался на приборной доске так, что ось его карданова кольца оказывалась параллельной продольной оси самолета, а ось вращения маховика — поперечной На шкале прибора было три широких деления. Если самолет летел без угловой скорости поворота или прибор был не запущен, то пружина удерживала стрелку у среднего деления. Если же самолет начинал уходить с заданного курса, то есть возникала угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси, то в соответствии с правилом Н. Е. Жуковского маховик создавал гироскопический момент $M_Г$, который пытался совместить по кратчайшему пути вектор кинетического момен-

та H маховика с вектором угловой скорости ω разворота самолета. Поворачиваясь, маховик деформировал пружину, которая создавала момент, противодействующий гироскопическому. В результате стрелка прибора отклонялась, указывая наличие и направление угловой скорости разворота самолета. Получая эту информацию, летчик принимал меры для устранения разворота самолета.

Гироскопический указатель поворота оказался очень полезным прибором. В дальнейшем значительно усовершенствованный, он стал использоваться не только для обнаружения угловой скорости самолета, но и для точного измерения величины угловой скорости самолетов и других движущихся объектов. В этом новом качестве он вошел в состав современных систем ориентации, навигации, стабилизации и получил весьма разнообразные названия — **гиротахометр, дифференцирующий гироскоп, датчик угловой скорости.**

К середине 20-х гг. был значительно усовершенствован корабельный гирокомпас. Однако для авиации он оказался не перспективным прибором, так как на самолетах, уже тогда летавших с большими скоростями, гирокомпас имел бы слишком большие скоростные ошибки. Простой пример: пусть самолет летит на широте $\varphi=60°$ в северном направлении со скоростью $V_C=800$ км/ч. Несложно вычислить, что скоростная ошибка δ_C гирокомпаса, установленного на этом самолете, составит около 42°. Ошибка получилась недопустимо большой, ее трудно учесть или скомпенсировать, поскольку в полете могут быстро меняться значения широты φ и скорости полета V_C.

Итак, гирокомпас на самолетах неприменим из-за большой скоростной ошибки. Где же выход? Выход был найден в совместном (комплексном) использовании различных типов курсовых приборов.

Например, магнитный компас может вполне удовлетворительно работать при равномерном прямолинейном полете. В других режимах (набор скорости и торможение, выполнение виражей и т. д.) магнитный компас имеет большие ошибки. Но к счастью, эти другие режимы непродолжительны по времени. Поэтому возникла мысль: во время эволюций самолета определять его курс с помощью более устойчивого к этим эволюциям гироскопа с тремя степенями свободы, который кратковременно (8...12 мин, пока Земля не уйдет из-под гироскопа) мо-

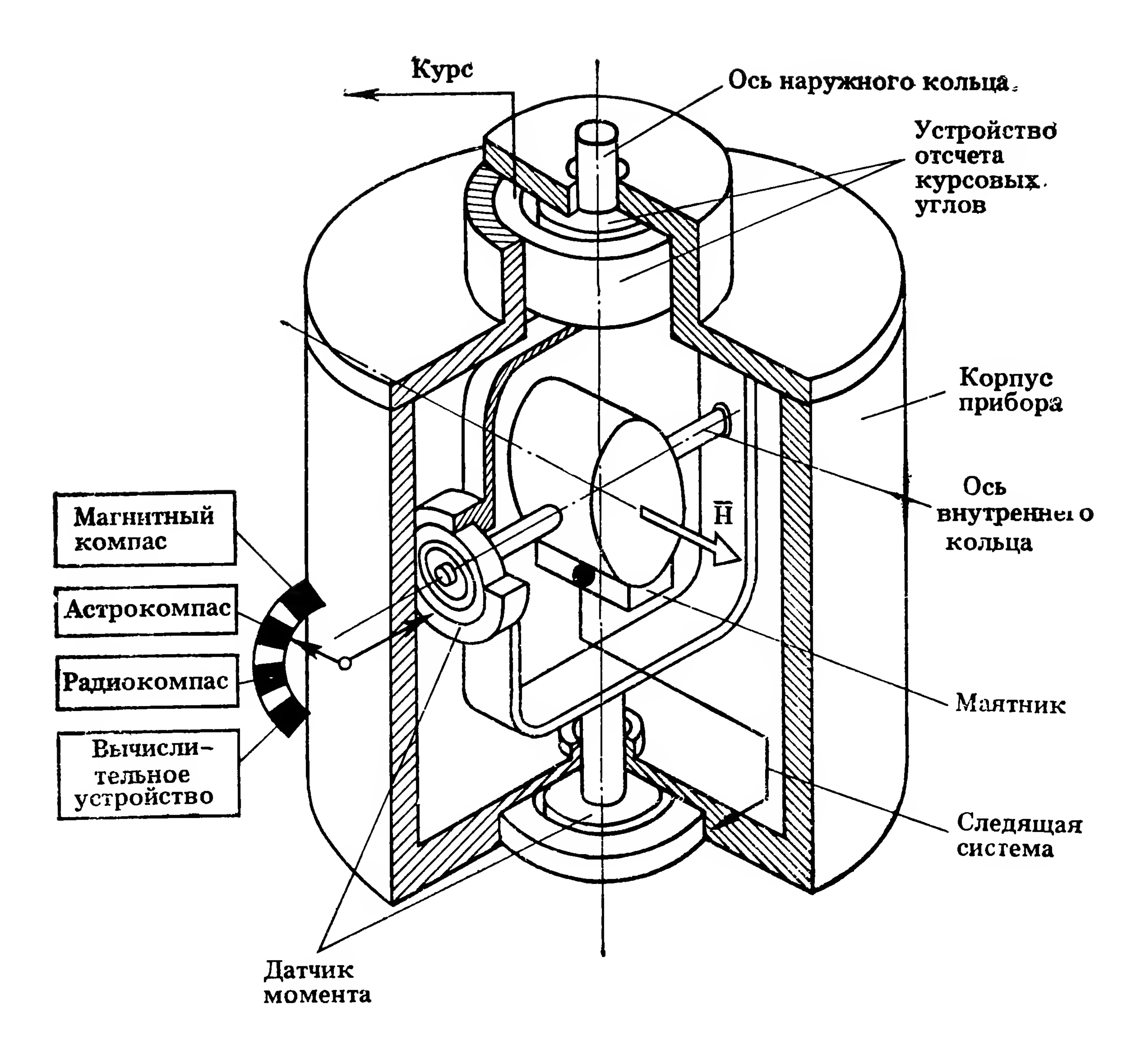


Рис. 15
Схема гирополукомпаса

жет с приемлемой точностью удерживать заданное ему первоначальное направление относительно Земли.

Выполнив эволюцию самолета по гироскопическому прибору, дальнейший прямолинейный полет летчик опять ведет с помощью магнитного компаса.

Так появился в авиации важный навигационный прибор — **гирополукомпас.** «Полу» потому, что сам прибор не отыскивает плоскость меридиана, как это делает гирокомпас или магнитный компас, а лишь удерживает заданное ему направление.

Гирополукомпас (рис. 15) — это гироскоп с тремя степенями свободы, ось вращения маховика которого с помощью специальной следящей системы, чувствительным элементом которой является уровень, удерживается в горизонтальной плоскости. На оси внутреннего кольца карданова подвеса имеется устройство, называемое дат-

чиком момента. Это устройство, представляющее собою специальный плоский электродвигатель, может создавать момент вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса и, следовательно, вызывать прецессию гироскопа вокруг оси наружного кольца, которая на шарикоподшипниковых опорах устанавливается в корпусе прибора. Последний на амортизаторах крепится к самолету. Для снижения ошибок прибора желательно, чтобы ось наружного кольца во все время движения оставалась почти вертикальной. Для отсчета курсовых углов в гирополукомпасе, так же как и в гирокомпасе, применяются или механические устройства (шкала — тонкая черта), или электрические (вращающиеся трансформаторы), причем одна часть отсчетного устройства (шкала, ротор вращающегося трансформатора) устанавливается на оси наружного кольца и стабилизируется гироскопом, а другая часть (тонкая черта, статор вращающегося трансформатора) крепится на корпусе прибора, который связан с корпусом самолета. Чтобы гирополукомпас превратился в хранителя азимутального направления на самолете, нужно, во-первых, выставить ось вращения маховика в заданном направлении (в частном случае это направление меридиана), во-вторых, подавая корректирующие сигналы на датчик момента, вызвать такую прецессию гироскопа, чтобы ось вращения его маховика удерживалась во все время полета на первоначально заданном ей направлении относительно Земли. Как видите, все довольно сложно, сразу возникает масса вопросов и среди них два основных: откуда брать корректирующие сигналы и как свести к минимуму «собственную вредную прецессию» гироскопа, вызванную в первую очередь моментами трения в опорах карданова подвеса и неуравновешенностью гироузла.

На первый вопрос коротко можно ответить так. В современных курсовых авиационных системах корректирующий сигнал на гирополукомпас поочередно может поступать от магнитного компаса (для защиты от электрических и магнитных полей самолета он устанавливается в самом кончике крыла), от астрономического компаса, от радиокомпаса, от вычислительного устройства. Причем корректирующий сигнал от вычислительного устройства идет непрерывно, а от различных типов компасов — лишь в те моменты времени, когда они работают наиболее точно. Несмотря на наличие многих разновидностей

компасов на самолете, информация о его курсе снимается только с гирополукомпаса, так как его показания наиболее стабильны на всех режимах полета.

Ошибка определения курса с помощью описанной системы на современных самолетах гражданского флота составляет 0,5 ... 1°.

Отвечая на второй вопрос, можно было бы рассказать еще одну полную напряженного труда и драматизма историю создания гироскопического прибора. Но нужно ли? Видимо, ясно уже теперь, что создание гироскопического прибора — сложнейшая научно-техническая задача, решение которой дается ценой предельного напряжения воли и интеллекта.

Гирокомпас в космосе

Еще одной обширной областью, где гироскопическая техника в целом и приборы типа гирокомпаса в частности завоевали прочные позиции, является космос.

Работа спутника будет качественной и надежной, если установленная на нем аппаратура (солнечные батареи, радиоантенны, фотоаппараты, стыковочные устройства и т. д.) во время движения спутника будет занимать заранее определенное («штатное») положение в пространстве. Отсюда возникает задача ориентации спутника и его автоматическое удержание в заданном положении. Чаще всего таким заданным положением является горизонтальное положение спутника и расположение его продольной оси в плоскости орбиты. Для того чтобы узнать, отклонился ли спутник от заданного ему положения, нужны чувствительные элементы. Информация, снимаемая с них, используется для выравнивания спутника.

И вот здесь возникает трудность. Из повседневного опыта мы знаем, что горизонтальность площадок проверяется устройствами, действие которых основано на использовании сил притяжения Земли (маятники, уровни, отвесы), а курсовые углы измеряются различными компасами. Двухстепенные гирокомпасы Фуко вообще на подвижном основании (например, на спутнике) работать не могут, а маятниковым гирокомпасам для работы также необходимы силы тяготения. Но на спутнике невесомость. Следовательно, маятник теряет свои замечательные свойства, а вместе с ним на орбите оказывается не-

работоспособным и маятниковый трехстепенной гирокомпас.

Как же построить прибор, «замечающий» отклонения продольной оси спутника от заданного курса, то есть от плоскости орбиты? И снова ученые нашли оригинальное решение. Они использовали то обязательное условие полета спутника, что одна из его трех осей (назовем ее нормальной) должна быть всегда вертикальна, то есть лежать на продолжении радиуса Земли (вертикальность нормальной оси спутника в полете обеспечивается с помощью специального прибора — инфракрасной вертикали). Таким образом, на спутнике «восстановлено» направление силы тяжести. Этого оказывается достаточно для работы на спутнике курсового гироскопического прибора, который носит специальное название — **гироорбитант.**

В простейшем случае гироорбитант, как и гирополукомпас, имеет гироскоп с тремя степенями свободы, установленный в кардановом подвесе, устройство для отсчета курсовых углов и два датчика момента, расположенных на осях карданова подвеса. А вот бесполезный в невесомости уровень заменен на датчик угла, расположенный на оси внутреннего кольца карданова подвеса. Чаще всего в качестве датчика угла применяется специальный миниатюрный трансформатор. Электрический сигнал, снимаемый с него, усиливается и подается одновременно на оба датчика момента.

Гироорбитант на спутнике устанавливается так, чтобы ось его наружного кольца располагалась параллельно нормальной оси спутника. Это означает, что ось наружного кольца, несмотря на вращение спутника по орбите, все время остается вертикальной. Эта особенность гироорбитанта позволяет использовать для его работы принцип трехстепенного маятникового гирокомпаса. Маятниковый эффект в гироорбитанте создается следующим образом. Датчик угла «замечает» отклонение оси вращения маховика от вертикали (то есть от оси наружного кольца) и «сообщает» об этом датчику момента, расположенному на оси внутреннего кольца. Последний создает управляющий момент, аналогичный маятниковому в трехстепенном гирокомпасе.

После того как маятниковый момент воспроизведен в невесомости, работа гироорбитанта, вращающегося по орбите, не отличается от работы трехстепенного гирокомпаса, установленного на экваторе вращающейся Земли.



КАЧКЕ — БОЙ!

ГЛАВА 5

Независимо от того, по какому пути пойдет дальнейшее развитие корабельного гироскопа, его изобретение является одной из блестящих страниц техники, доказывающей возможность преодолевать мощные силы природы путем умелого использования законов механики.*

Р. Граммель

Качка и ее последствия. Первые попытки защиты от качки. Непосредственные гиростабилизаторы. Гирогоризонты. Принцип силовой гироскопической стабилизации. Гироблоки на трехколечных шарикоподшипниках, поплавковые гироблоки, динамически настроенные гироскопы. Индикаторные гиростабилизаторы

Первые очаги сопротивления

Качку мы обычно связываем с волнующимся морем и кораблями, но «владения» ее более обширны. Еще в начале века злая власть качки была неограниченной.

На качающемся корабле плохо работают важные навигационные приборы (компасы, секстанты), трудно вести прицельный огонь артиллерии, многие пассажиры сходят на берег на ватных ногах, с позеленевшими лицами — их мучила морская болезнь.

Качка самолета — болтанка — приводила примерно к тем же последствиям.

Движение любых других объектов — спутников, ра-

* Имеется в виду успокоитель качки корабля, изобретенный О. Шликом.

кет, автомобилей, планетоходов — сопровождается качкой, которая мешает работе установленной на них аппаратуры — радиоантенн, телескопов, уровней, головок самонаведения, вооружения, кинофототелекамер и т. д.

С качкой нужно было бороться, и первыми в бой вступили средневековые моряки. Они попытались ограничить власть качки и создать на качающемся корабле площадку, неизменно сохраняющую горизонтальное положение. Эта площадка необходима была морякам прежде всего для проведения навигационных астрономических измерений.

Идея оказалась совершенно верной, а вот техническое решение пришло не сразу. Сначала на кораблях стали устанавливать люльки — большие маятники-качели, наивно полагая, что на качающемся корабле, так же как и на суше, платформа качелей будет стремиться сохранить горизонтальное положение. Однако маятники вели себя на качающемся корабле весьма загадочно: изредка они выполняли свое назначение и удерживали платформу горизонтально, но гораздо чаще начинали раскачиваться вместе с кораблем, иногда размах колебаний маятника становился даже больше бортовой качки корабля. На кораблях от люлек-маятников пришлось отказаться, но явлением заинтересовались ученые.

Первые же исследования движения маятника показали, что на качающемся основании он не может сохранять устойчивое положение. Причиной тому оказались силы трения в опорах подвеса, увлекавшие маятник вслед за качающимся основанием, и силы инерции, порожденные ускоренным движением основания.

Задача о поведении маятника на движущемся основании оказалась настолько практически важной и интересной, что ее решению посвятили свои труды такие выдающиеся ученые, как М. Шулер, академики А. Н. Крылов, А. Ю. Ишлинский, профессор С. С. Тихменев, и многие другие.

Итак, маятник-отвес, надежно материализующий на неподвижном основании вертикальную линию и перпендикулярную к ней горизонтальную площадку, на качающейся палубе корабля своих функций не выполняет. Он сам нуждается в защите от качки. И такая защита нашлась...

Весной 1743 г., потерпев крушение, не вернулся в порт приписки английский фрегат «Виктория». Злословили,

что виноват в этом искусный механик Д. Серсон, который пытался создать на качающемся фрегате устойчивый горизонт и был наказан богом за свою дерзость. Зачем же понадобилось Серсону создавать свой горизонт, и чем не устраивал его горизонт, созданный всевышним? В средние века основным прибором, позволявшим определять по высотам светил местоположение корабля в открытом море, был секстант. Чтобы пользоваться им, нужно было видеть естественный горизонт.

Однако часто естественный горизонт становился недоступным наблюдению — скрывался дымкой, ночной мглой или просто море сильно волновалось, а корабль качался. В этих случаях пользоваться секстантом было невозможно. Поэтому Серсон решил создать непосредственно на корабле устойчивый искусственный горизонт и заменить им в работе с секстантом естественный.

По замыслу Серсона, искусственный горизонт должен был представлять собою площадку, которая сама устанавливалась бы в плоскость горизонта и оставалась бы в этой плоскости, несмотря на качку корабля.

Площадка, которая сама стремится отыскать плоскость горизонта, — это платформа маятника, но можно ли заставить такую площадку сохранить горизонтальное положение при качке корабля? «Можно, — решил Серсон, — для этого нужно использовать замечательные свойства волчка, его удивительную способность сохранять неизменное положение оси вращения и плоскости диска, несмотря на качку основания, на которое опирается ось волчка».

Серсон создал прибор, в котором соединил уникальные свойства маятника и волчка. Основной деталью прибора была перевернутая вверх дном металлическая чаша. Плоская наружная поверхность дна чаши была отполирована до зеркального блеска, а внутренняя поверхность дна своей центральной точкой опиралась на шпиль Массивные цилиндрические края чаши опускались значительно ниже опоры, превращая чашу в физический маятник. Поэтому полированная поверхность дна чаши всегда стремилась занять горизонтальное положение.

Чаша приводилась во вращение с помощью шнура, навитого на ее боковую цилиндрическую поверхность. Через некоторое время после запуска зеркальная поверхность дна чаши, покачавшись, устанавливалась в плоскость горизонта и оставалась в этом положении, несмот-

ря на качку корабля. Теперь с помощью секстанта можно было определять высоту светила относительно искусственного горизонта, материализуемого зеркальной поверхностью дна чаши.

Устройство Серсона было испытано в море и получило положительную оценку. Однако, продолжая испытания прибора, Серсон погиб при кораблекрушении, а его изобретение было надолго забыто. И тем не менее прибор Серсона следует считать родоначальником целой ветви гироскопических приборов, получивших названия **гиромаятники, гировертикали, гирогоризонты,** — приборов, которые на качающемся основании материализуют плоскость горизонта или перпендикулярную к ней линию — вертикаль.

Необходимость материализации плоскости горизонта возникает на многих движущихся объектах и преследует весьма разнообразные цели. Мы уже говорили об искусственном горизонте для секстанта. Приведем еще один пример.

В 1118 г. в Европе раздался первый пушечный выстрел: завоеватели-арабы штурмовали испанскую крепость Сарагосу. Старинные пушки были примитивны по конструкции, тяжеловесны и неудобны в обращении. Ствол пушки крепился к деревянной колоде-станку, изменить позицию пушки было сложно. Поэтому пушки применялись там, где не нужно было часто менять позиции: из пушек били по крепостным стенам, а из крепостей — по войскам, ведущим осаду.

Уже первые артиллеристы знали, что дальность полета ядра, а следовательно, и точность стрельбы зависят от угла возвышения ствола пушки над плоскостью горизонта. Поэтому, чтобы вести прицельный огонь, первые наводчики регулировали возвышение ствола пушки, подкладывая под ее колоду бревна разного диаметра.

Артиллерия во все времена была грозным оружием, она долго и упорно совершенствовалась. Этапным было изобретение французов: по приказу короля Карла VIII (XV в.) стволы пушек стали устанавливать на колесные лафеты. Упряжки лошадей быстро перевозили пушки на выгодные позиции, противник нес большие потери, французы выигрывали сражения. Позднее, чтобы еще больше повысить маневренность артиллерии и эффективность ее применения, пушки стали устанавливать на кораблях, танках, самолетах. Маневренность возросла, но вести

прицельный огонь стало труднее, так как корабли, танки, самолеты — качающиеся основания.

В начале 50-х гг. на экраны страны вышел фильм «Адмирал Ушаков». Он рассказывал о славных победах русского флота под командованием адмирала Ф. Ф. Ушакова, победах, обеспеченных талантом флотоводца и тяжелым матросским трудом.

В фильме есть интересный эпизод: адмирал Ушаков учит своих матросов вести прицельный артиллерийский огонь с качающегося основания, для чего пушка и артиллерийский расчет располагались на своеобразном тренажере — платформе огромных качелей. Искусство точной стрельбы в этих условиях состояло в том, чтобы произвести выстрел в тот момент, когда платформа качелей на мгновение займет горизонтальное положение. В любой другой момент времени платформа качелей отклонена от плоскости горизонта, угол возвышения ствола пушки отличается от требуемого, промах неизбежен.

Однако искусством точной стрельбы с качающегося основания, как и любым другим видом искусства, могли овладеть лишь талантливые одиночки, которых всегда было гораздо меньше, чем пушек, установленных на кораблях. Нужны были другие, более совершенные приемы прицельной стрельбы. И тогда обратились к принципам гироскопической стабилизации.

Волна сильнее гироскопа

Попытку сразу решить все проблемы, создаваемые качкой корабля, сделал немецкий инженер Отто Шлик. В 1904 г. он предложил стабилизировать корабль целиком, установив на нем большой гироскоп. Упрощенная схема гироскопического успокоителя качки корабля системы Шлика представлена на рис. 16. Большой гироскоп устанавливался в трюме корабля так, чтобы в начальном положении ось вращения его маховика была бы вертикальна. Это положение оси обеспечивалось маятниковой подвеской гироскопа. Ось внутреннего кольца карданова подвеса гироскопа была параллельна поперечной оси корабля. Роль наружного кольца карданова подвеса играл корпус корабля, продольная ось которого соответствовала наружной оси карданова подвеса гироскопа.

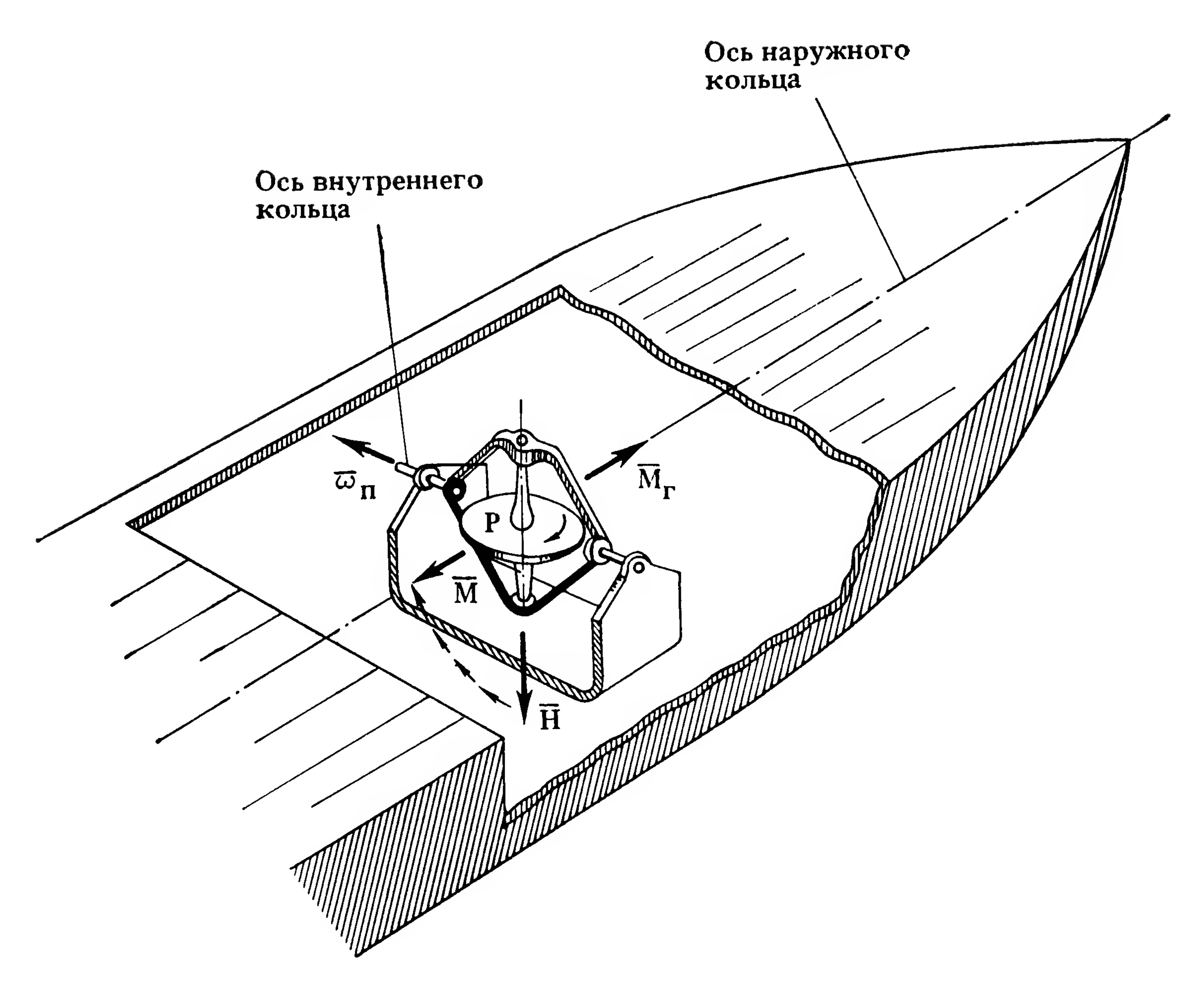


Рис. 16.
Схема гироскопического успокоителя качки корабля

Принцип работы успокоителя качки можно уяснить, если вспомнить свойства гироскопа с тремя степенями свободы. Волна, подходящая, например, к правому борту, пытается накренить корабль относительно его продольной оси. Следовательно, к корпусу корабля вокруг продольной оси будет приложен момент внешних сил *М*, который передается на гироскоп. Этот момент вызовет прецессию $\omega_п$ гироскопа вокруг оси внутреннего кольца карданова подвеса. Прецессия создаст гироскопический момент $M_г$, который, пока существует прецессия, будет равен и противоположно направлен моменту внешних сил *М*. Таким образом гироскопический момент $M_г$ противодействует кренящему моменту *М*, в результате чего качка корабля значительно ослабевает.

Следует еще раз подчеркнуть, что в отличие от любых других механических процессов прецессия и гироскопический момент возникают практически одновременнс с появлением возмущающего момента. Этим объясняется высокое качество гироскопической стабилизации.

Для опытной проверки предложения Шлика был со·

здан огромный гироскоп, имевший массу 502 кг, его ротор приводился во вращение паровой турбиной. Этот гироскоп был установлен на небольшом судне водоизмещением 56 т.

Испытания устройства в условиях штормового моря показали хорошие результаты: корпус судна надежно стабилизировался, амплитуда качки уменьшалась во много раз и составляла 1...2°.

Однако, когда опыты были перенесены на более крупные корабли, положительных результатов не получили: собственных сил даже огромного гироскопа для стабилизации больших кораблей не хватало. Проблема осталась. Для ее решения были предложены другие, более совершенные схемы гироскопических успокоителей качки, но и они до конца задачу не решили.

В последнее время проблема стабилизации палубы стала особенно актуальна, так как морские и океанские просторы бороздят корабли, на которых базируются самолеты и вертолеты. Посадить самолет даже на неподвижную взлетно-посадочную полосу аэродрома — задача не из простых. Трудности возрастают многократно, если приходится сажать самолет или вертолет на качающуюся палубу корабля. Поэтому работы по созданию успокоителей качки корабля продолжаются.

Поскольку не удалось осуществить непосредственную гироскопическую стабилизацию корабля целиком, то решили стабилизировать отдельные устройства, размещенные на нем: пушки, прицельные посты, посадочные площадки для вертолетов и т. д. Это тоже довольно массивные объекты. Вот как описывает процесс стабилизации одного из них немецкий ученый К. Магнус: «Фирма приступила в 1929 году к разработке трехгироскопной платформы, которая предназначалась для стабилизации положения дальномерного поста вместе с обслуживающим его расчетом на корабле, испытывающем качку. Многотонный измерительный пост стабилизировался непосредственно благодаря использованию момента, создаваемого тремя большими гироскопами, поскольку в то время еще не существовало систем управления с датчиками момента необходимой силы. Каждый из трех гироскопов весил 330 кг и имел в диаметре 53 см. Не считая гироскопа Шлика, это были, по-видимому, самые большие гироскопы из когда-либо применявшихся в Германии. Их кинетические моменты и силы реакции были необычайно

велики, так что положение платформы удерживалось с высокой точностью даже при сильной качке. Но если отклонение карданова подвеса превышало дозволенные 15°, большой гироскоп давал весьма внушительное представление о своей силе. Он разносил вдребезги все, что встречалось ему на пути. И не было силы, которая могла бы ему при этом помешать».

В приведенных примерах описаны так называемые **непосредственные гироскопические стабилизаторы.** Их особенность состоит в том, что они выполняют сразу две функции: «чувствуют» возмущающий момент и подавляют его собственным гироскопическим моментом.

Для стабилизации положения больших масс, испытывающих интенсивные возмущающие воздействия, это совмещение функций оказалось непрактичным, так как требовались большие, тяжелые гироскопы, способные развивать гигантские гироскопические моменты. Эти моменты оказывались не всегда достаточными для целей стабилизации, но всегда могли при неблагоприятных условиях вызвать аварию. Поэтому на флоте и в авиации от непосредственной гироскопической стабилизации больших масс пришлось отказаться.

Иное дело в космосе. Там обладающий большой массой космический корабль испытывает слабые возмущающие воздействия, подавление которых вполне по силам гироскопу. Поэтому разработка и совершенствование непосредственных гироскопических стабилизаторов продолжаются.

Идея применения гироскопических устройств для стабилизации космических летательных аппаратов восходит к трудам К. Э. Циолковского, который в своей книге «Свободное пространство» писал о возможности стабилизации космических летательных аппаратов в «безвоздушном пространстве» с помощью «быстровращающихся кружков».

На флоте угловую стабилизацию (защиту от качки) объектов, обладающих большой массой, — пушек, постов наводки, радиоантенн и др. — стали осуществлять с помощью специальных следящих систем, в которых гироскопические приборы освобождены от силовых функций. Они играют важную роль чувствительных элементов, то есть устройств, обнаруживающих отклонение объекта от заданного положения, в частности от плоскости горизонта.

Система стабилизации массивных объектов в общих чертах устроена следующим образом. Объект устанавливается в карданов подвес и поэтому может поворачиваться (прокачиваться) относительно основания, на котором он размещен. С помощью гироскопов на этом же основании материализуется маленькая горизонтальная площадка, которая с помощью своего карданова подвеса также «развязывается» от угловых движений основания. Дальше задача заключается в том, чтобы заставить массивный объект, подлежащий стабилизации, повторять те положения, которые занимает горизонтальная площадка относительно основания. Эта задача успешно решается с помощью специальных дистанционных следящих систем, включающих в себя устройства, регистрирующие углы поворота массивного объекта относительно горизонтальной площадки, усилители электрических сигналов и силовые электродвигатели, поворачивающие массивный объект, согласуя его положение с положением горизонтальной площадки.

Первые отечественные гироскопические системы с применением дистанционных следящих систем были разработаны в начале 30-х гг. под руководством Н. Н. Острякова.

Таким образом, массивный объект, повторяя все движения маленькой горизонтальной площадки, сам остается все время в горизонтальном положении, разумеется, с точностью, определяемой ошибками следящей системы и гироскопического прибора, материализующего горизонтальную плоскость **(гирогоризонта).**

Первые гирогоризонты представляли собой, по существу, гиромаятники Д. Серсона и Г. Флериэ, но выполненные с учетом последних достижений техники. В частности, вместо маховика, опирающегося на шпиль, был применен асинхронный гиромотор, заключенный в карданов подвес. Ось вращения маховика гиромотора была вертикальна, а сам гиромотор устанавливался в приборе так, что его центр масс оказывался ниже точки пересечения осей карданова подвеса, чем и обеспечивался маятниковый эффект.

Однако гиромаятники прожили короткую жизнь, так как обладали существенным недостатком. Их принцип действия состоял в том, что при отклонении оси вращения маховика от вертикали маятник непосредственно воздействовал на него, создавая моменты силы тяжести

вокруг осей карданова подвеса. Эти моменты вызывали прецессию, которая возвращала ось вращения маховика снова к положению истинной вертикали. Однако возвращение шло не кратчайшим путем, а по многовитковой спирали. Время установления горизонтальности площадки было достаточно большим. С этим недостатком мирились в неторопливые времена Д. Серсона и Г. Флериэ, но в быстротекущем XX в. он стал недопустим.

И тогда фирма «Сперри» предложила так называемый принцип радиальной коррекции гироскопа. Сущность принципа заключалась в том, что отклоненная от вертикали ось вращения маховика гироскопа возвращалась в исходное положение кратчайшим путем, почти по прямой линии. Технически реализовать этот принцип удалось благодаря остроумному предложению, согласно которому непосредственное силовое воздействие маятника на гироскоп устранялось. Маятнику отводилась лишь роль элемента, чувствительного к отклонению оси гироскопа от вертикали. Так как маятник освобождался от силовых функций и превращался лишь в индикатор, то появилась возможность разработать миниатюрные самостоятельные конструкции маятников. На гироскоп устанавливалось по два миниатюрных маятника (так как гироскоп мог отклониться от плоскости горизонта вокруг двух осей карданова подвеса). Силовое воздействие на гироскоп создавали специальные устройства — датчики момента, которые управлялись сигналами миниатюрных маятников.

Идея раздельного выполнения маятников и гироскопа оказалась очень плодотворной. Гироскоп по-прежнему надежно защищал от качки установленные на нем маятники, а маятники, управляя гироскопом с помощью датчиков момента, удерживали ось вращения его маховика в положении, близком к истинной вертикали. В результате на качающемся основании возникала устойчивая, гироскопически стабилизированная горизонтальная площадка.

«Гироскоп с искусственными прецессиями»

Итак, большие массы гироскоп стабилизирует с помощью дистанционных следящих систем. Но есть еще много устройств, обладаю-

щих относительно небольшими массами, которые устанавливаются на борту движущегося объекта и потому также нуждаются в защите от качки. К таким устройствам относятся: измерители ускорений (акселерометры), телескопы, кино- и телекамеры, радиоантенны и многие другие подобные им устройства. Их защищают от качки, устанавливая на гиростабилизированные платформы.

В 1924 г. С. А. Ноздровский, русский авиатор, впоследствии известный советский специалист по авиационным приборам, предложил принцип силовой гироскопической стабилизации, принцип, позволивший решить ряд сложных задач и широко раздвинувший границы применения гироскопической техники. Полученный им патент на изобретение назывался «Гироскоп с искусственными прецессиями».

Сущность принципа силовой гироскопической стабилизации заключается в следующем. Ноздровский предложил несколько изменить работу трехстепенного гироскопа, поручив ему стабилизацию не плоскости, а лишь одной оси. При этом появилась возможность максимально использовать уникальные особенности гироскопа — его способность мгновенно создавать гироскопический момент, парирующий внешний возмущающий момент, и его способность, прецессируя, давать информацию о факте действия внешнего возмущающего момента. А коль скоро такая информация имеется, то подавление вредного возмущающего момента можно поручить не гироскопу, а электродвигателю, который позже стал называться двигателем стабилизации.

Итак, трехстепенной гироскоп с искусственными прецессиями С. А. Ноздровского может осуществлять с высокой точностью стабилизацию одной оси. Но на практике чаще требуется стабилизировать не одну ось, а две (то есть плоскость) или три (то есть пространство, объем). Как быть? Думаю, что решение этой задачи читатель без труда найдет сам. Нужно применить два или три одинаковых гироскопа, поручив каждому стабилизацию одной оси.

Таким образом, в основе двух- и трехосных силовых гироскопических стабилизаторов лежит одноосный стабилизатор. Познакомимся более подробно с его работой.

Предположим, что для целей навигации на космическом летательном аппарате (КЛА) необходим телескоп,

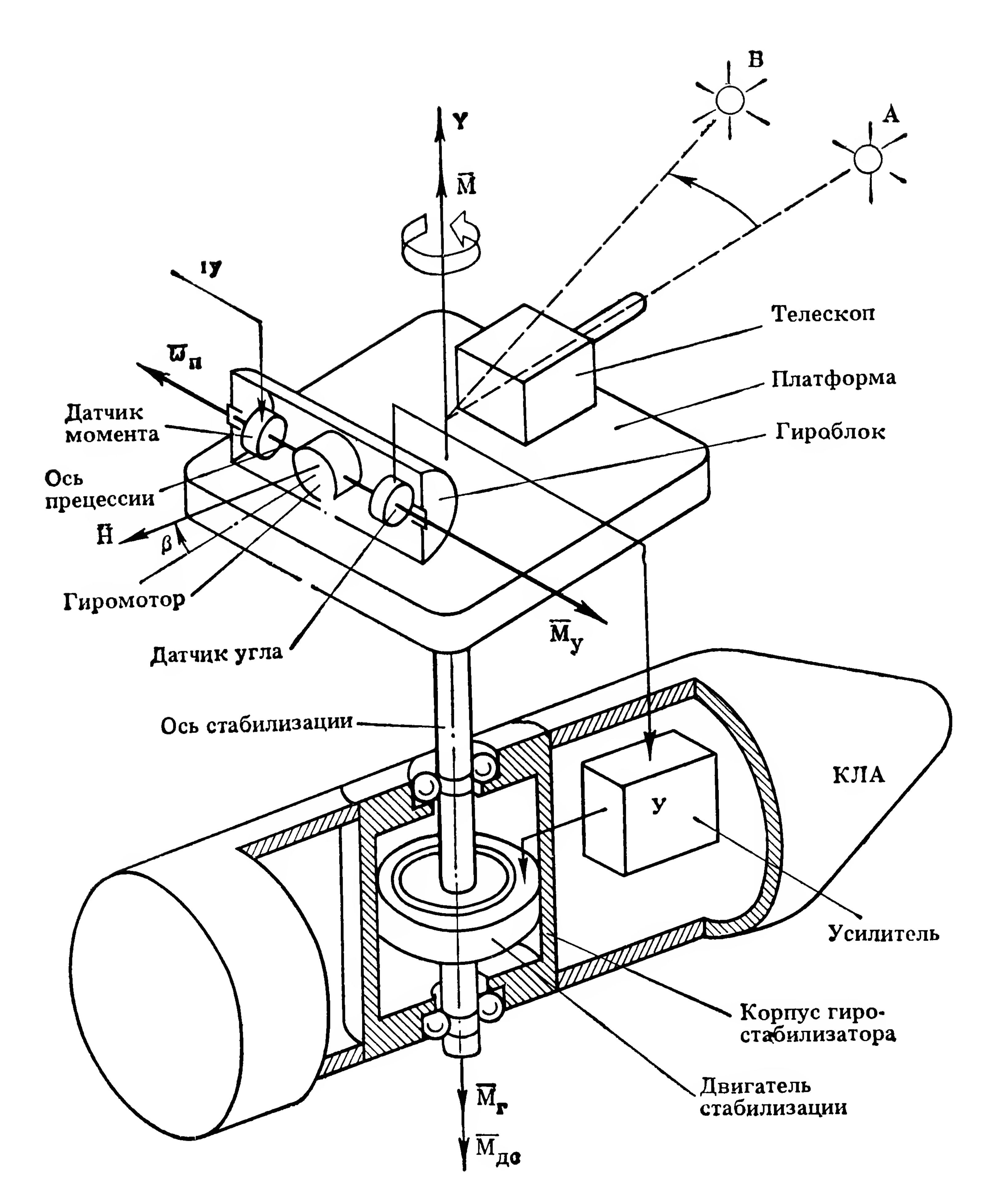


Рис. 17.
Схема одноосного силового гиростабилизатора

который должен быть постоянно направлен на звезду А (рис. 17). Если телескоп неподвижно прикрепить к борту КЛА, то при качке КЛА телескоп будет качаться вместе с ним, «потеряет» звезду и станет бесполезным грузом на борту. Чтобы этого не произошло, нужно защитить телескоп от качки, применив гиростабилизатор

Предположим, что КЛА качается только вокруг одной оси, а именно оси *Y*. В этом случае задача решается

с помощью одноосного гиростабилизатора, например силового.

На платформе гиростабилизатора устанавливается телескоп и гироблок, маховик гиромотора которого имеет две степени свободы относительно платформы. Ось платформы на шарикоподшипниках крепится к корпусу гиростабилизатора, а последний неподвижно закреплен на борту КЛА. Ось платформы носит специальное название — ось стабилизации, на ней установлен двигатель стабилизации.

Ось двухстепенного гироблока также носит специальное название — ось прецессии, на ней установлены датчик угла и датчик момента.

Платформа вместе с установленным на ней гироблоком может поворачиватьсся вокруг оси стабилизации относительно корпуса КЛА. Следовательно, относительно корпуса КЛА маховик гироблока имеет три степени свободы, то есть одноосный силовой стабилизатор представляет собою гироскоп с тремя степенями свободы и обладает его свойствами.

Гиростабилизатор может работать в двух режимах: режиме стабилизации и режиме управления.

Если во время полета КЛА требуется только удержать телескоп на заданном ему направлении, то есть изолировать телескоп от угловых движений корпуса КЛА, то гиростабилизатор работает в режиме стабилизации. При этом гиростабилизатор функционирует следующим образом. Предположим, КЛА начал поворачиваться вокруг оси Y. В результате этого к оси стабилизации будет приложен момент трения шарикоподшипниковых опор M, который попытается увлечь за собой ось стабилизации и установленную на ней платформу с телескопом.

Но на платформе стоит гироскоп. Он воспринимает момент M и, прецессируя вокруг оси прецессии, практически мгновенно создает гироскопический момент $M_г$, действующий вокруг оси стабилизации. Пока существует прецессия гироскопа $\omega_п$, его гироскопический момент уравновешивает любой внешний возмущающий момент, в частности момент трения опор оси стабилизации M. В этом случае гироскоп проявляет свои силовые свойства, поэтому гиростабилизатор называется силовым.

Таким образом, в первые мгновения после появления возмущающего момента отклонения платформы вокруг

оси стабилизации не происходит. Это исключительной важности явление возможно благодаря мгновенной реакции гироскопа. В дальнейшем если бы не было двигателя стабилизации, то прецессия гироскопа происходила до тех пор, пока ось вращения маховика не станет параллельной оси стабилизации. Но в этом положении стабилизирующие свойства гироскопа исчезают, так как он теряет одну степень свободы. Поэтому на практике допускают лишь небольшие углы β поворота гироскопа, вызванные прецессией. Обеспечить малые углы β удается потому, что на помощь гироскопу приходит двигатель стабилизации.

Итак, в первый момент времени гироскоп уравновешивает возмущающий момент, но сам при этом прецессирует. В следующий момент времени, когда угол β прецессии становится достаточно большим, его обнаруживает датчик угла гироблока и посылает управляющий сигнал через усилитель на двигатель стабилизации.

Получив управляющий сигнал, двигатель стабилизации развивает момент $M_{ДС}$, действующий вокруг оси стабилизации и уравновешивающий внешний возмущающий момент M. Гироскоп, освобожденный от силовых функций, прекращает прецессировать.

Следовательно, возмущающий момент M, действующий вокруг оси стабилизации, не может повернуть платформу вокруг этой оси. Объект стабилизации — телескоп — надежно изолирован от влияния качки корпуса КЛА.

Если во время полета КЛА возникнет необходимость повернуть объект стабилизации вокруг оси стабилизации, например перебросить линию визирования телескопа со звезды А на звезду Б, то используют режим управления гиростабилизатором.

Если попытаться осуществить поворот объекта стабилизации вокруг оси стабилизации привычным образом, то есть приложив момент вокруг оси стабилизации, например, с помощью двигателя стабилизации, то желаемого результата не получим: гироскоп воспримет момент, созданный двигателем стабилизации, как возмущающий и подавит его сначала собственным гироскопическим моментом, а затем с помощью того же двигателя стабилизации. Поворота платформы и объекта стабилизации не произойдет.

Для умышленного поворота платформы и объекта

стабилизации вокруг оси стабилизации нужно подать управляющий сигнал I_y на датчик момента гироблока. Датчик момента создает управляющий момент M_y, действующий вокруг оси прецессии гироблока. Под действием управляющего момента гироскоп начнет прецессировать вокруг оси стабилизации, пытаясь совместить вектор H с вектором M_y по кратчайшему пути. В результате платформа с объектом стабилизации будет поворачиваться вокруг оси стабилизации до тех пор, пока не прекратится управляющий электрический сигнал I_y.

Вот так работал бы идеальный одноосный силовой гиростабилизатор. Но идеальный гиростабилизатор еще никому создать не удалось. Все реально существующие гиростабилизаторы имеют ошибки, которые проявляются в отклонении платформы от требуемого положения.

Каковы же причины ошибок стабилизации? Мы видели, что возмущающий момент, действующий вокруг оси стабилизации, поворота платформы не создает и, следовательно, ошибок стабилизации не вызывает (если учитывать более тонкие эффекты, то ошибки стабилизации будут, но они подбором параметров гиростабилизатора сводятся до допустимого уровня). А вот момент, действующий вокруг оси прецессии, вызывает поворот платформы вокруг оси стабилизации. Хорошо, если это полезный управляющий момент. Но вокруг оси прецессии может действовать и нежелательный, возмущающий момент, например момент трения опор. Прецессия гироскопа вокруг оси стабилизации возникнет и в этом случае. Но теперь она будет самопроизвольной, нежелательной, вызывающей ошибку стабилизации.

Таким образом, одной из основных причин ошибок стабилизации является возмущающий момент, действующий вокруг оси прецессии. Возмущающий момент как назойливый гость. перед ним закрывают дверь (ось стабилизации), так он влезает в окно (ось прецессии).

Гироскопические блоки

Чтобы создавать точные гиростабилизаторы и другие прецизионные гироскопические приборы, нужно было в первую очередь избавиться от момента трения, действующего вокруг оси карданова кольца (оси прецессии) двухстепенного ги-

роблока. Борьба с моментами трения опор красной нитью проходит через всю историю развития гироскопической техники.

Моменты трения опор изучались, изучаются и будут изучаться, так как до сих пор в вопросах трения много неясного. Предлагались, предлагаются и будут предлагаться новые, более совершенные конструкции опор. Однако коварные моменты трения очень медленно сдают свои позиции.

В первых гиростабилизаторах в качестве опор оси прецессии использовалось изобретение Леонардо да Винчи — шариковый подшипник с двумя кольцами. Пока требования к точности гиростабилизаторов были невелики, эта опора вполне устраивала разработчиков гироприборов. Но когда требования к точности резко возросли, от двухколечного шарикового подшипника, пришлось отказаться, поскольку он обладал несколькими существенными недостатками. Во-первых, значение его момента трения было очень нестабильным — в одном и том же подшипнике оно могло изменяться в десятки раз. Происходило это и в зависимости от взаимного углового расположения колец подшипника, и в зависимости от условий эксплуатации прибора. Во-вторых, среднее значение момента трения было достаточно велико (десятые доли и даже единицы Гсм). В-третьих, возникавшие при повороте корпуса гироблока моменты трения обеих опор (левой и правой или верхней и нижней) складывались. Таким образом, на гироскоп действовал удвоенный момент трения.

Казалось, что от шарикового подшипника как опоры оси прецессии нужно было отказаться вообще. Однако непрактично было терять и преимущества, которые давал шарикоподшипник: большую грузоподъемность, простоту конструкции узла опор, моментальную готовность к действию и др.

И тогда инженеры-гироскописты поставили, казалось бы, неразрешимую задачу: сохранив достоинства шарикоподшипника, значительно снизить его момент трения.

Эту задачу удалось решить, использовав один из основных принципов изобретательства: обрати вредное в полезное. А что было самым вредным в шариковом подшипнике? Конечно же, момент трения. И тогда решили подавить момент трения... моментом трения. Обратили внимание на то, что в гироблоке всегда используются

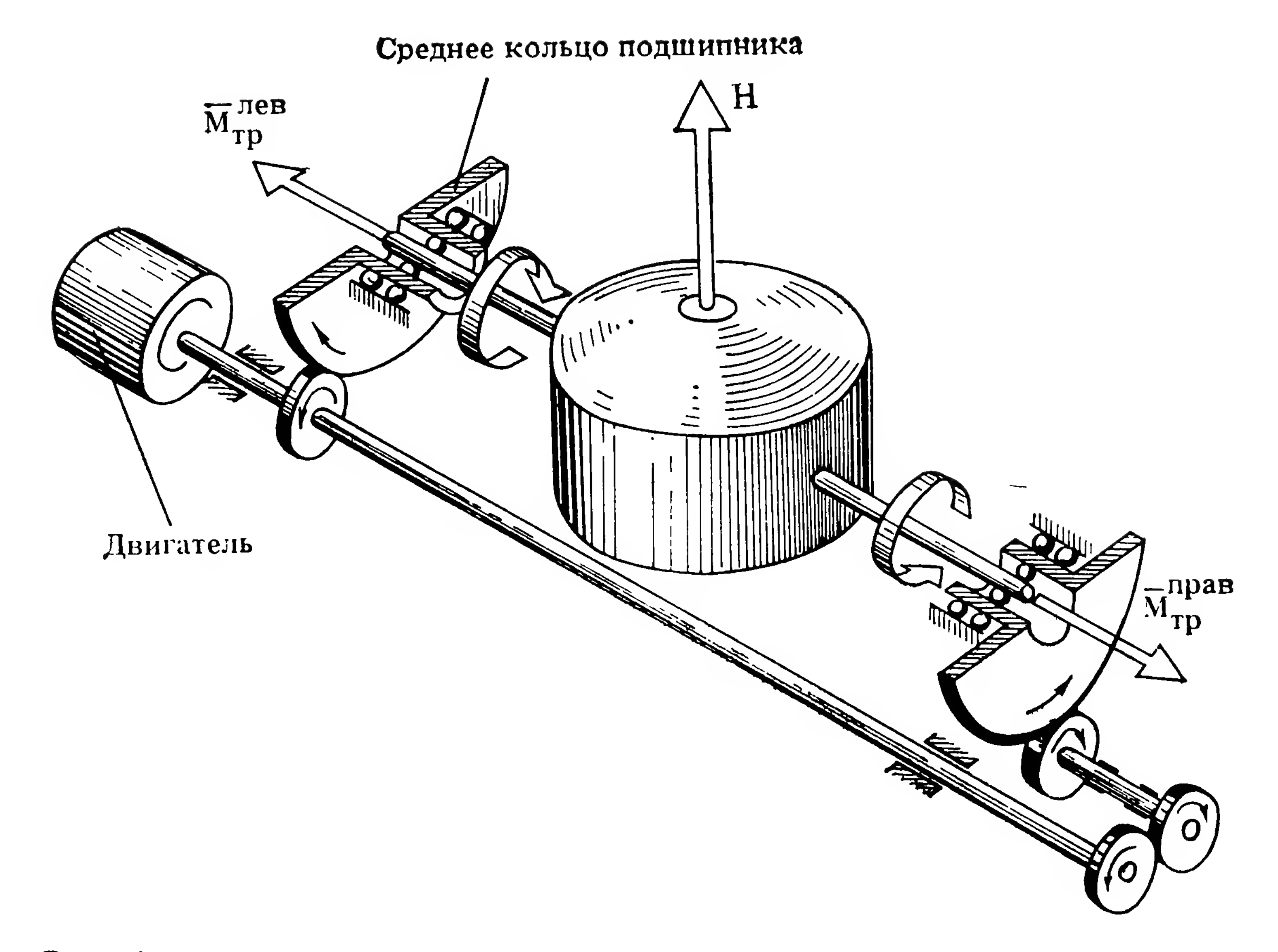


Рис. 18.
Схема двухстепенного гироблока на трехколечных шариковых подшипниках

два шарикоподшипника, и каждый из них создает момент трения. Следовательно, задача состояла в создании такой конструкции опор, в которой бы моменты трения шарикоподшипников были направлены в противоположные стороны и компенсировали друг друга. Но компенсация (вычитание) любых величин, в том числе и моментов трения, возможна лишь в том случае, когда эти величины достаточно стабильны. Следовательно, прежде чем начать вычитать моменты трения, нужно было стабилизировать их величины.

Все эти задачи удалось решить, создав шариковый подшипник не с двумя, а с тремя кольцами: внутренним, средним и наружным, разделенными двумя рядами шариков.

Такие трехколечные шариковые подшипники устанавливались на концах оси прецессии двухстепенного гироблока (рис. 18). Средние кольца могли приводиться во вращение от специального миниатюрного (с наперсток) двигателя.

Опора на трехколечных шариковых подшипниках работает следующим образом. Средние кольца двигате-

лем приводились во вращение в разные стороны. После того как кольца совершали несколько полных оборотов, направление их вращения изменялось на противоположное. Трехколечные подшипники позволили снизить результирующий момент трения, действующий на гироскоп вокруг оси прецессии, в 10...15 раз по сравнению с двухколечным подшипником. Происходило это по многим причинам, основные из которых следующие. Вращение средних колец позволило осреднить, сделать более стабильной величину момента трения в каждом подшипнике. Противоположное вращение средних колец вызывало и противоположно направленные моменты трения $M_{тр}$, то есть моменты трения вычитались. Гироскоп прецессировал под действием разности моментов трения, а не их сумм.

После того как направление вращения средних колец менялось на противоположное, менялось направление разностного момента трения и направление прецессии гироскопа. Таким образом, в идеальном случае гироскоп, реагируя на разностный момент трения, должен был бы лишь слегка покачивать платформу около заданного положения. Однако в реальных условиях из-за нестабильности осредненных моментов трения наблюдаются медленные, заранее непредсказуемые повороты гиростабилизированной платформы.

Такие повороты специалисты называют дрейфом, подчеркивая этим образным термином медленность, неравномерность и неопределенность направления движения гироскопа и платформы.

Гироблоки на трехколечных шариковых подшипниках, обладая высокой точностью, нашли широкое применение в гиростабилизаторах и других гироскопических приборах.

Другой, более широко применяемый в настоящее время способ снижения момента трения в опорах двухстепенных гироблоков основан на использовании выталкивающей силы жидкости.

Двухстепенные гироблоки, в которых применен этот способ, называются **поплавковыми гироскопами.** Схема такого прибора показана на рис. 19.

Основные узлы поплавкового гироскопа следующие: гиромотор, заключенный в герметичную цилиндрическую гирокамеру; узел, состоящий из гиромотора и гирокамеры, — «поплавок». На полуосях «поплавка» расположе-

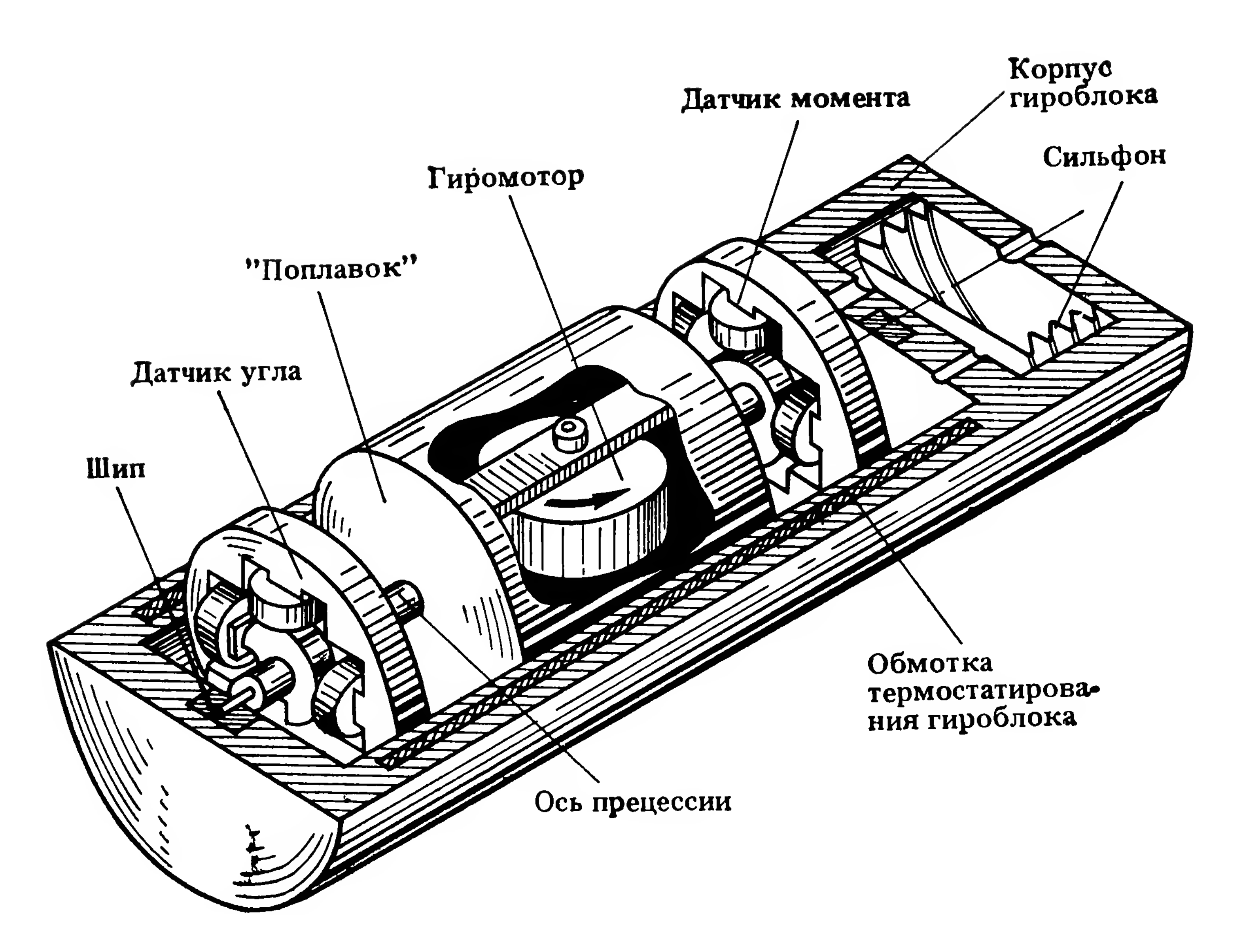


Рис. 19.
Схема поплавкового гироскопа

ны подвижные узлы датчика угла и датчика момента, а также стальные цилиндрические шипы, которые входят в круглые отверстия подшипников, установленных в герметичном корпусе гироблока. Опоры, примененные в поплавковом гироскопе и состоящие из шипа и подшипника, носят специальное название камневые опоры. Название опор подчеркивает, что подшипник изготавливается из полудрагоценных камней — агата, рубина, корунда. Выбор материала подшипника обусловлен тем, что трущаяся пара стальной шип — камневый подшипник имеет при прочих равных условиях наименьший момент трения, чем любая другая пара материалов. Если трехколечные шарикоподшипники были изобретены гироскопистами, то камневые опоры — часовщиками.

А началось все с женских украшений. В начале XVIII в. генуэзские мастера-ювелиры научились сверлить микроскопические отверстия в твердом драгоценном камне рубине. Затем это искусство неведомым путем перешло из Ломбардии в Англию, где оно тщательно охранялось. Охрана не помогла: некто Малле, завладев секретом, продал его женевским часовщикам. По-

следние, освоив технологию сверления малых отверстий в твердых камнях — рубине, сапфире и даже алмазе, нашли ей неожиданное и очень эффективное применение: они стали изготавливать миниатюрные высококачественные подшипники для опор часовых механизмов. С тех пор на долгое время швейцарские часы завоевали славу лучших в мире.

Но мы отвлеклись. Итак, подбор материалов деталей камневых опор — условие необходимое, но недостаточное для достижения малых моментов трения. Второе условие состоит в том, чтобы трущиеся поверхности имели минимальную площадь соприкосновения, то есть, иными словами, диаметр шипа должен быть минимален. Естественным ограничением здесь является прочность шипа. В поплавковых гироскопах применяются камневые опоры с диаметром шипа, составляющим десятые доли миллиметра. Почему же не ломаются столь тонкие шипы в тяжелых условиях работы гироскопических приборов? Вот здесь мы подошли к самому главному — к гидростатической разгрузке камневых опор. В поплавковом гироскопе все пространство между поплавковым узлом и внутренней поверхностью корпуса гироблока заполняется специальной тяжелой и вязкой (как молодой мед) жидкостью. Следовательно, на погруженный в жидкость поплавок действует выталкивающая сила. Как доказал Архимед, выталкивающая сила жидкости равна весу жидкости, вытесненной погруженным в нее телом. В зависимости от соотношения величин веса тела и выталкивающей силы погруженное в жидкость тело может находиться в трех состояниях: оно может тонуть, всплывать и находиться в безразличном положении внутри объема жидкости. Последний случай используется в поплавковых гироскопах, и, следовательно, выталкивающая сила жидкости полностью компенсирует вес поплавка, камневые опоры не воспринимают никаких нагрузок, следовательно, их момент трения равен нулю.

«Но, — скажет внимательный читатель, — если опоры не воспринимают нагрузок, то зачем они нужны вообще?» Читатель, конечно, прав. Был описан маловероятный идеальный случай гидростатической разгрузки камневых опор. В реальных условиях практически никогда не удается обеспечить точное равенство веса и выталкивающей силы. Поэтому камневые опоры всегда несут какую-то небольшую нагрузку, обусловленную раз-

ностью этих сил. Кроме того, камневые опоры воспринимают радиальные нагрузки, создаваемые внутренними причинами: гироскопическим моментом и гидродинамическими силами, возникающими при повороте поплавка вокруг оси прецессии.

При благоприятных условиях камневые опоры поплавковых гироскопов воспринимают небольшие радиальные нагрузки, создающие очень малые моменты трения. Но когда малые моменты трения были достигнуты, то произошло совершенно неожиданное. Поплавковые гироскопы не обеспечивали ожидаемой от них высокой точности. В чем же причина? Оказалось, что когда были сведены к незначительным величинам моменты трения опор, то обнаружились и стали активно действовать другие причины, создающие вредные моменты вокруг оси прецессии поплавкового гироскопа. Раньше они «прятались за спину гиганта» — момента трения и о них не знали либо не обращали внимания. Теперь, когда «гигант» был сокрушен, пришлось воевать с его союзниками. А этих союзников, то есть причин вредных моментов, оказалось очень много. Специалистам уже сейчас известно несколько десятков таких причин. Среди них остаточная неуравновешенность поплавкового узла, влияние магнитных полей, неравномерного прогрева прибора, тяжения, создаваемые датчиком угла, датчиком момента, токоподводами к гиромотору, и многие другие.

Инженеры-гироскописты, совершенствуя поплавковый гироскоп, постепенно устраняли или снижали до допустимого уровня вредные моменты. В результате титанической работы был создан поплавковый двухстепенной гироблок, который обладал очень высокой чувствительностью. Он мог легко обнаруживать угловую скорость, равную не только скорости суточного вращения Земли, но и скорости годового ее вращения. Кроме высокой точности и чувствительности, прибор, заполненный жидкостью, обладал высокой прочностью по отношению к внешним механическим воздействиям — перегрузкам, вибрациям, ударам. Большие мастера рекламы американцы писали в рекламном проспекте об одном из первых образцов поплавкового гироскопа: «Прибор не теряет свойств, даже если им заколачивать гвозди». Конечно, как всегда реклама преувеличивала.

Замечательные свойства поплавкового гироскопа оплачены дорогой ценой. Процесс изготовления прибора

долог и сложен. В нем заняты рабочие и инженеры очень высокой квалификации. Все это обусловливает высокую стоимость поплавковых гироскопов. Специалисты считают, что один такой гироскоп размером с обычный граненый стакан стоит столько же, сколько легковой автомобиль средней мощности.

Острота проблемы высоких стоимости и трудоемкости поплавкового гироблока несколько снизилась, когда разработали и стали применять поплавковые гироблоки не с двумя, а с тремя степенями свободы. Поплавковый узел трехстепенного гироблока в отличие от двухстепенного с помощью камневых опор крепился не к корпусу гироблока, а к карданову кольцу, и только оно (также с помощью камневых опор) крепилось к корпусу гироблока. На каждой из двух осей карданова подвеса были установлены по датчику угла и датчику момента Объем и вес гироблока несколько увеличились, высокие стоимость и трудоемкость остались, но теперь поплавковый гироблок имел уже не один, а два информационных канала. Это существенно меняло дело, поскольку гироприборы, например трехосные гиростабилизаторы, можно было строить с меньшим числом гироблоков.

Однако в целом поплавковый гироблок очень сложен в изготовлении и имеется много причин, вызывающих его дрейф. В основе этих недостатков лежит наличие жидкости внутри гироблока.

Ученые и инженеры продолжали искать пути совершенствования гироблоков. И вот в начале 60-х гг. в древнейшей из наук — механике, казалось бы, хорошо изученной предыдущими поколениями ученых, был открыт новый эффект — эффект динамической настройки вращающейся упругомассовой системы.

Проявление эффекта состоит в том, что при выполнении условий настройки вращающейся механической системы удалось получить опоры осей карданова подвеса, имеющие малые, а главное, очень стабильные моменты сопротивления.

Поясним этот сложный эффект на простейшей схеме трехстепенного гироблока (рис. 20). Маховик с помощью торсионов «Н» крепится к карданову кольцу. Торсион — металлический стержень, допускающий упругое скручивание вокруг своей продольной оси и не допускающий ее изгибов. Концы торсионов «Н» жестко закреплены в маховике и каркадановом кольце. Кардано-

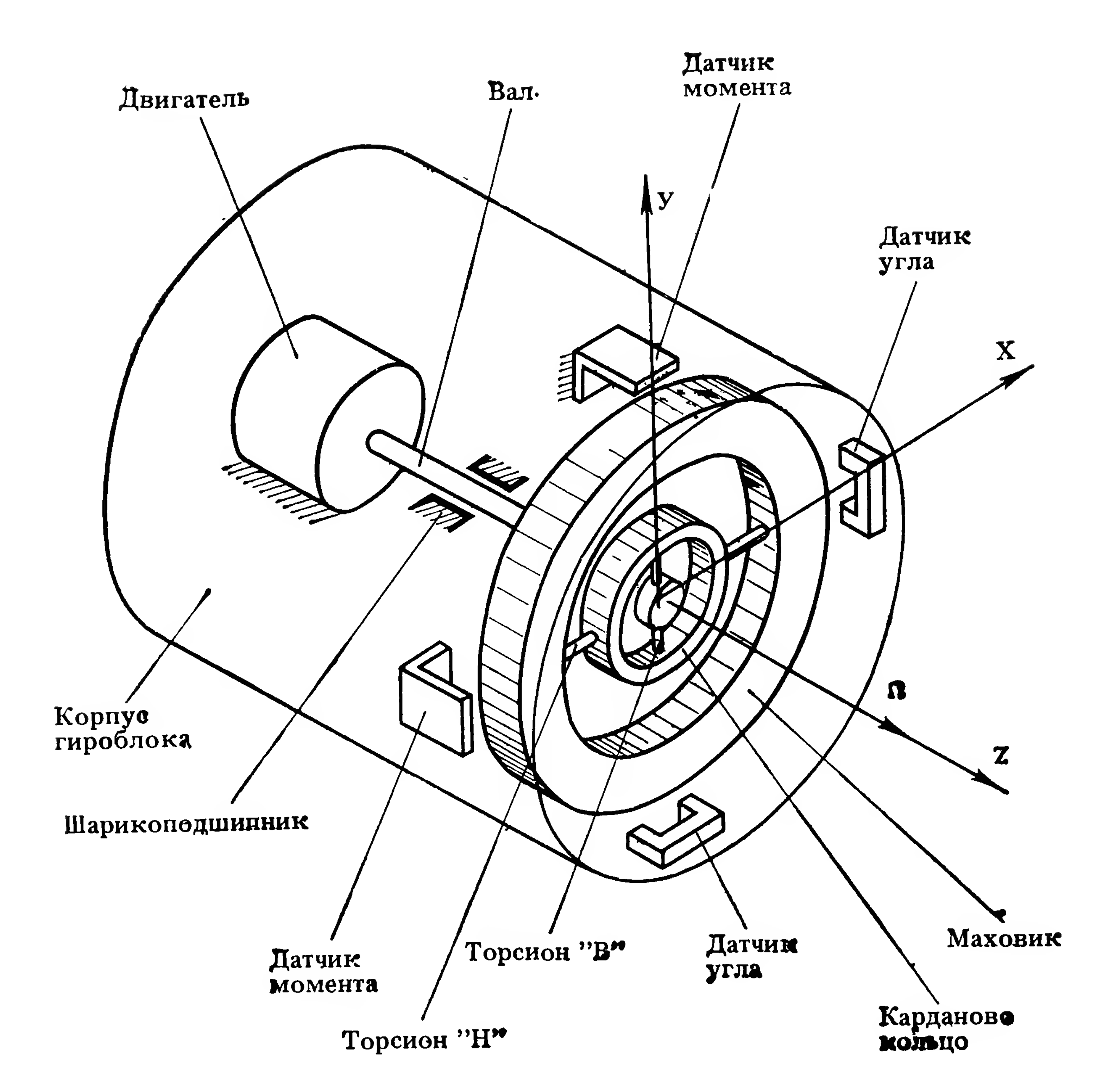


Рис. 20.
Схема динамически настраиваемого гироскопа

во кольцо также с помощью торсионов «В» крепится к валу электродвигателя, который на шариковых подшипниках установлен в корпусе гироблока. В отличие от классических схем гироприборов здесь карданово кольцо расположено внутри маховика и быстро вращается вместе с ним. В данном случае маховик имеет три степени свободы: он может, упруго закручивая торсионы «Н», поворачиваться вокруг оси X, упруго закручивая торсионы «В», вместе с кардановым кольцом поворачиваться вокруг оси Y и свободно вращаться вместе с торсионами и кардановым кольцом вокруг оси Z.

Для измерения углов отклонения корпуса гироблока относительно маховика вокруг осей X и Y установлены датчики угла, а для приложения к маховику управляющих моментов предусмотрены датчики моментов. Таким

образом, гироблок имеет два информационных канала — одновременно измеряет углы отклонения корпуса относительно маховика вокруг двух осей X и Y.

Такое устройство гироблока имеет много достоинств. Прежде всего здесь почти побежден основной недуг классических схем гироскопов — дрейф, вызванный смещением центра масс гиромотора, так как вокруг осей карданова подвеса поворачивается одно простейшее тело — монолитный маховик, а не такая сложнейшая электромеханическая система, как гиромотор. Кроме того, здесь сведены к минимуму крайне нестабильные моменты трения, действующие вокруг осей карданова подвеса, нет электроэлементов с обмотками, расположенных на подвижных частях гироблока, следовательно, не нужны токоподводы к ним (исключены вредные моменты, создаваемые токоподводами).

Рациональна компоновка гироблока, так как маховик имеет максимальный в заданном объеме диаметр, что позволяет получать малогабаритные гироблоки с относительно высокими значениями кинетических моментов.

Почему же гироблок с упругим вращающимся подвесом, обладающий таким набором положительных качеств, долгое время не конкурировал с поплавковым гироскопом? Для этого были серьезные причины. Как это часто бывает в гироскопической технике, устранив в конструкции гироблока одну группу вредных моментов, взамен нее получили другую. И «возглавил» эту другую группу упругий момент, создаваемый торсионами. Физически ясно: при отклонении маховика от плоскости, перпендикулярной оси вала, торсионы закручиваются и прикладывают к маховику упругие моменты, противодействующие его отклонению. Эти моменты были названы восстанавливающими. Даже при очень малых углах отклонения маховика такие моменты вызывают недопустимо большие дрейфы. Однако восстанавливающие моменты достаточно стабильны, и это давало основание для их компенсации. Надо было изобрести устройства, создающие момент, в точности равный по величине восстанавливающему, но противоположный ему по направлению. Такой момент назвали опрокидывающим

Предлагались различные компенсирующие устройства — электромагнитные, пружинно-механические, но успех все не приходил. Устройства были сложны, а точ-

ность компенсации восстанавливающего момента оставалась недостаточной. Однако напряженный труд как всегда дал свои результаты. Как уже говорилось, в механике был открыт эффект динамической настройки, и реализация его оказалась на удивление простой. Было доказано, что компенсировать восстанавливающий момент торсионов можно достаточно точно с помощью инерционного опрокидывающего момента, развиваемого вращающимся кардановым кольцом. Для этого нужно было осуществить настройку вращающейся упругомассовой системы, то есть подобрать и удерживать во все время эксплуатации гироблока единственное сочетание параметров его элементов, а именно моментов инерции карданова кольца, жесткости торсионов на скручивание и угловой скорости вращения вала. Оказалось, что настройка — вполне технически решаемая задача. Реализация настройки позволила создать гироблоки, по точности не уступающие поплавковым, но меньше их по размерам.

Гироблоки, использующие эффект динамической настройки, получили название **динамически настраиваемые гироскопы** (ДНГ). Они нашли широкое применение в прецизионных гироприборах.

Однако ДНГ, как и их предшественники — поплавковые гироблоки, еще достаточно дороги и сложны в изготовлении, возможности повышения их точности далеко не исчерпаны. Предстоит большая работа по совершенствованию ДНГ.

Таким образом, хотя имеются определенные успехи в области создания гироблоков, проблема до конца еще не решена.

Инженеры и ученые продолжают настойчивые исследования и поиски. О направлениях этих поисков будет рассказано в последней главе «Не механикой единой».

Сильнее качки

И все-таки качка отступила, на подвижных объектах появились небольшие платформы, изменить угловое положение которых качка оказалась не в силах. Удерживаются платформы в заданных им положениях с помощью гироскопов. Эти небольшие платформы часто называют трехосными гиростабилизаторами.

Строятся трехосные гиростабилизаторы в основном по двум схемам, одна из которых использует информационные и силовые свойства гироскопов, а другая — только информационные. Трехосные гиростабилизаторы, построенные по первой схеме, называются **силовыми**, а по второй — **индикаторными.**

Платформы трехосных гиростабилизаторов в зависимости от их конкретного назначения могут занимать самые разнообразные положения в пространстве.

Рассмотрим подробнее наиболее наглядный пример использования трехосного гиростабилизатора для удерживания на качающемся объекте горизонтальной плоскости и курсового направления.

Основное достоинство силового гироскопического стабилизатора состоит в том, что гироскоп практически мгновенно подавляет вредные возмущающие моменты и тем самым значительно снижает технические требования к элементам канала стабилизации. Но чтобы подавлять, нужно иметь силу. Поэтому в силовых гиростабилизаторах применяют достаточно крупные (как яблоко средних размеров) гиромоторы. Построенный с использованием трех таких гиромоторов гиростабилизатор имеет массу 10...15 кг. Так как принцип действия силового гиростабилизатора уже подробно пояснялся, то познакомимся с устройством и работой трехосного индикаторного гиростабилизатора (рис. 21).

В последнее время достигнуты значительные успехи в области создания прецизионных следящих систем и миниатюрных гироблоков с тремя степенями свободы. Это явилось основой для разработки трехосных гиростабилизаторов индикаторного типа.

На платформу, которую нужно стабилизировать, устанавливают два миниатюрных гироблока (1 и 2), в которых гироскопы имеют относительно платформы три степени свободы. На концах осей прецессии гироблоков расположены датчики угла и датчики момента. Если платформу нужно удерживать в плоскости горизонта, то на ней размещаются два электролитических уровня, которые при отклонении платформы от плоскости горизонта выдают электрические сигналы Платформа обладает тремя степенями свободы относительно корпуса гиростабилизатора, жестко (или через амортизаторы) связанного с корпусом движущегося объекта. Она может поворачиваться вокруг вертикальной оси z относитель-

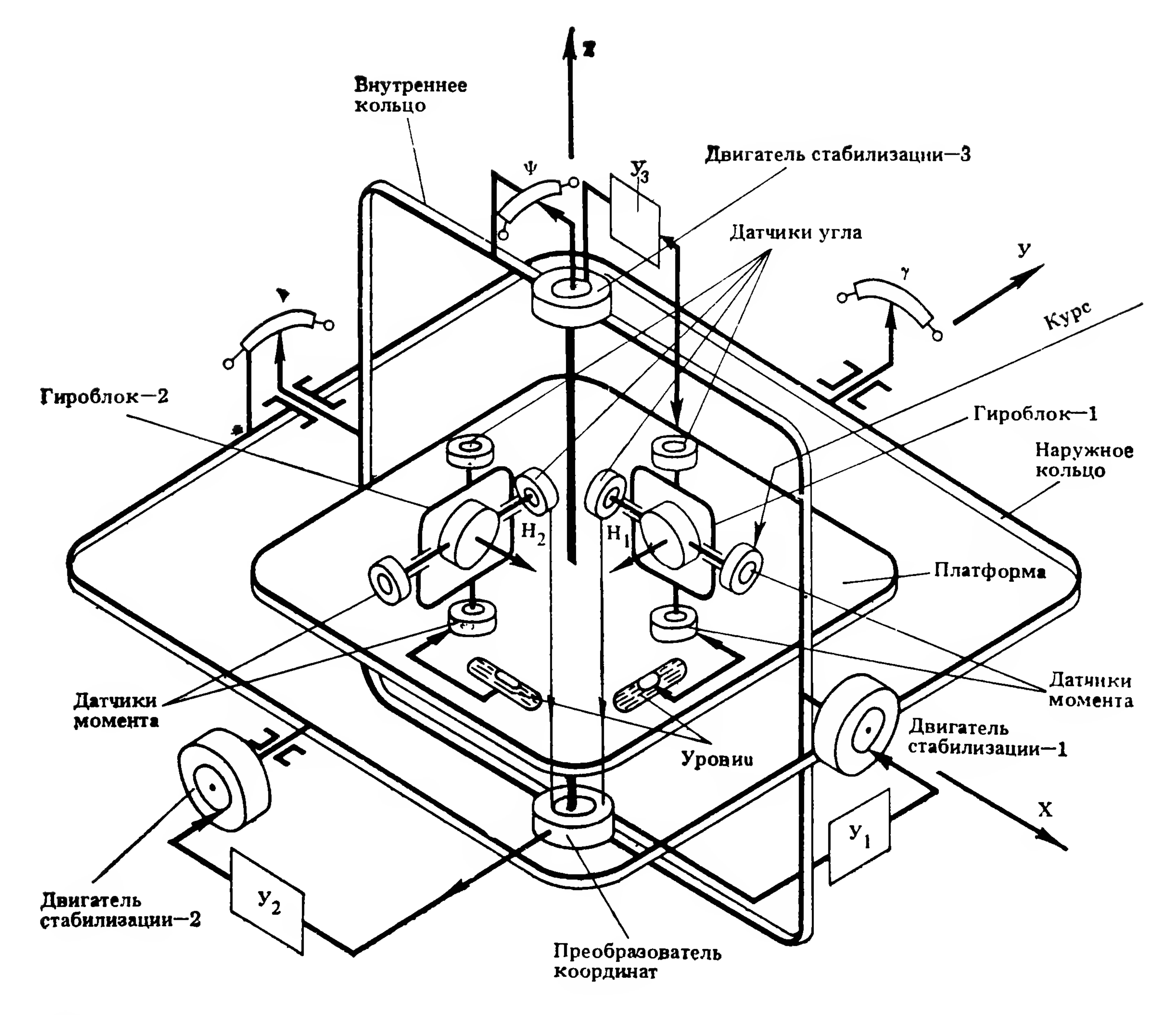


Рис. 21.
Схема трехосного индикаторного гиростабилизатора

но внутреннего кольца карданова подвеса, вместе с внутренним кольцом вокруг оси x относительно наружного кольца карданова подвеса и вместе с внутренним и наружным кольцами вокруг оси y относительно корпуса гиростабилизатора.

Напомним, что оси x, y, z называются осями стабилизации, а оси кардановых колец трехстепенных гироблоков — осями прецессии.

На концах осей стабилизации устанавливаются устройства (называемые иногда съемными датчиками или датчиками команд), измеряющие углы отклонения ψ, σ, γ корпуса гиростабилизатора (а следовательно, и корпуса движущегося объекта) относительно платформы, а также устройства, называемые двигателями стабилизации 1, 2, 3. Как видно из рис. 21, двигатель стабилизации 3 непосредственно связан с датчиком угла гироблока 1, а двигатели стабилизации 1 и 2 связаны с датчиками углов гироблоков 1 и 2 через промежуточное распредели-

тельное устройство, называемое преобразователем координат. Это усложнение необходимо, так как в процессе эксплуатации двигатели стабилизации 1 и 2 могут вместе с маневрирующим объектом и кольцами карданова подвеса повернуться в горизонтальной плоскости относительно гиростабилизированной платформы и установленных на ней гироблоков 1 и 2. В результате двигатели стабилизации «перепутают» управляемые ими оси стабилизации платформы, и нормальная работа гиростабилизатора будет нарушена. Преобразователь координат исключает такую возможность.

Упрощенно и кратко принцип действия индикаторного стабилизатора можно пояснить следующим образом.

В режиме стабилизации ось вращения маховика трехстепенного гироблока сохраняет определенное положение в пространстве и является базой, относительно которой регистрируются (с помощью датчиков угла) углы отклонения платформы. Если отклонение произошло, то дальше, получая управляющий сигнал от датчика угла, вступает в действие следящая система, исполнительный элемент которой — двигатель стабилизации — поворачивает платформу так, чтобы устранить возникшее отклонение. В результате действия следящих систем (по трем каналам) платформа сохраняет определенное гироскопами положение в пространстве.

Если нужно умышленно повернуть платформу (режим управления), например вслед за плоскостью горизонта, то на датчики момента гироблоков подаются управляющие сигналы с электролитических уровней.

Гироскопы начинают прецессировать вокруг горизонтальных осей, поворачиваясь относительно плоскости платформы. Углы поворота будут зарегистрированы датчиками угла и в действие вступят следящие системы, которые и повернут платформу вслед за гироскопом.

На датчик момента гироблока 1, удерживающего курсовое направление платформы, управляющий сигнал (так же, как и в гирополукомпасе) может подаваться от какого-либо компаса или от вычислительного устройства.

Таким образом, в описанной схеме гиростабилизатора гироскоп не оказывает силового воздействия на платформу. Он лишь указывает на факт отклонения платформы от заданного ей положения. Поэтому гиростабилизаторы, построенные по такой схеме, называются ин-

дикаторными. В этих гиростабилизаторах нет принципиальной необходимости в применении «сильных», крупногабаритных гиромоторов, в них можно применять миниатюрные гиромоторы и гироблоки.

Точность работы индикаторного гиростабилизатора в основном определяется точностью работы примененного в нем миниатюрного трехстепенного гироблока. Поэтому по-прежнему актуальной остается задача создания высокоточного трехстепенного гироблока. Для ее решения применяются разные методы. Создаются миниатюрные трехстепенные гироскопы, в которых ротор-шар центрируется относительно корпуса с помощью газовых струй, магнитных или электростатических полей; в других конструкциях миниатюрный карданов подвес размещается внутри вращающегося маховика (динамически настраиваемые гироскопы), есть и другие предложения. Идет настойчивый поиск.

Говоря об индикаторных гиростабилизаторах, нужно особо подчеркнуть, что их создание стало возможным благодаря успехам электроники. Если в силовых гиростабилизаторах вредные возмущающие моменты сначала подавляет гироскоп, а уже потом ему на помощь приходит двигатель стабилизации, то в индикаторных вредные моменты сразу должны подавляться двигателем стабилизации. Двигатель стабилизации может качественно выполнить свои функции, если своевременно получит управляющий сигнал достаточной силы. А это значит, что электронные узлы, примененные в индикаторном гиростабилизаторе, должны мгновенно и безошибочно в хаосе шумов выделять слабый полезный сигнал датчика угла, порожденный малейшим отклонением платформы от заданного положения, и, значительно усилив его, обеспечить высокое быстродействие двигателя стабилизации. При этом электронные узлы должны занимать малый объем, в противном случае теряется смысл применения миниатюрных гироблоков.

В настоящее время гиростабилизаторы продолжают развиваться и совершенствоваться. Постоянно решаются на новых уровнях «вечные проблемы» повышения точности, снижения размеров, массы, стоимости, трудоемкости гиростабилизаторов. Появляются новые объекты, которые требуют защиты от качки, а следовательно, и новых схем и конструкций гиростабилизаторов. Вот пример

На земном шаре все острее встает проблема нехват-

ки электроэнергии. Сейчас основная ее часть получается на тепловых электростанциях, сжигающих уголь и газ. К развитию гидро- и атомных электростанций уже подходят с большой осторожностью, так как они нарушают экологическое равновесие в природе.

Как же развивать энергетику? Один из вариантов состоит в использовании энергии Солнца. Установлено, что количество солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, составляет около 10^{14} кВт. Если бы удалось использовать хотя бы одну тысячную долю этой энергии, человечество могло бы считать энергетическую проблему решенной. Но на поверхности Земли использование солнечной энергии малоэффективно. Поэтому в числе других принципиально новых решений рассматривается вопрос о выводе в открытый космос солнечной электростанции (СЭС).

Чтобы получить мощность, сравнимую с существующими наземными электростанциями, площадь солнечных батарей СЭС должна составлять несколько десятков квадратных километров. Полученную энергию нужно будет преобразовать в радиоволны, чтобы передать на Землю, то есть будут необходимы преобразователь и передающая антенна диаметром около 1 км.

Чтобы работа этих колоссальных по размерам устройств СЭС была эффективной, нужно постоянно удерживать плоскость солнечной батареи перпендикулярно солнечным лучам, а мощный энергетический луч передающей антенны должен попадать в одно и то же место на Земле. Решение этих задач непременно потребует разработки новых систем гироскопической стабилизации СЭС и ее передающей антенны.



УПРАВЛЯЕТ ГИРОСКОП

ГЛАВА



Мне кажется, для аэроплана следует употребить как регулятор горизонтальности маленький, быстро вращающийся диск, укрепленный на осях таким образом, чтобы его плоскость могла всегда сохранять одно положение, несмотря на вращение и наклонение снаряда .

К.Э. Циолковский, 1894 г.

Возникновение идеи автоматического управления летательным аппаратом. Авторулевой торпеды. Автопилот самолета и ракеты. Система управления космическим летательным аппаратом

«Нужен автоматически действующий руль»

Константин Эдуардович Циолковский... Теперь это имя известно всему миру. Скромный преподаватель гимназий старинных русских городов Боровска и Калуги, человек несгибаемой воли, великий труженик, фантазер и писатель, ученый, указавший людям путь к звездам. «Земля-колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели». Люди, «земные распри позабыв», выходите на просторы Вселенной — вот лейтмотив всего творчества Константина Эдуардовича.

Но как доставить человека в космос? Пока это не ясно даже Циолковскому. Понятно одно — доставит человека в космос летательный аппарат. А какие типы летательных аппаратов уже существуют? Снаряд, выпущенный из пушки, аэростат и летательные аппараты тяжелее воздуха, ракета, аэроплан А. Ф. Можайского, планеры немецкого изобретателя О. Лилиенталя.

Пушечный снаряд, за который ратовали многие писатели-фантасты, отвергается сразу: он не может быть за-

селен людьми — для них будет гибельна «кажущаяся тяжесть», вызванная огромным ускорением снаряда при выстреле.

Ракета пока слаба, но ее нужно будет изучить более внимательно.

Аэропланы и планеры, эти летающие этажерки? Нет, Циолковский пока не верит в их будущее.

Аэростат. Конечно, он не сможет «умчать» человека в космос. Но поднять космический снаряд за пределы плотных слоев «густой атмосферы» Земли сможет. А это уже немало. Кроме того, аэростат может работать на благо людей и у поверхности Земли. Следовательно, аэростат должен скорее всего принести пользу людям. И Циолковский с жаром принимается за разработку аэростата. Он проектирует необычный для тех времен аэростат — брезентовый мешок, наполненный легким газом. Нет! Он разрабатывает принципиально новый аэростат — «металлический управляемый». Позже такие аэростаты стали называться дирижаблями и цеппелинами по имени немецкого отставного генерала, реализовавшего многие идеи К. Э. Циолковского.

К. Э. Циолковский отчетливо представлял себе картину полета своего аэростата. Продолговатый воздушный корабль окажется под воздействием самых различных сил: порывов ветра, изменения тяги двигателя, изменения массы корабля (расход горючего), перемещения экипажа и грузов внутри корабля и многих других.

Эти силы могут повернуть корабль вокруг его продольной оси — возникнет угол крена корабля, они могут повернуть корабль и вокруг поперечной оси, заставив его, например, поднять нос и опустить хвост, — возникнет угол тангажа. Наконец, возмущающие силы могут развернуть корабль вокруг его вертикальной оси, вынуждая отклониться от заданного направления движения — возникнет угол рыскания.

В таких условиях полета аэронавту придется нелегко: он будет вынужден непрерывно управлять рулями корабля, устраняя нежелательные углы крена, тангажа и рыскания. Аэронавт будет быстро утомляться, а это опасно: утомленный пилот может допустить аварию. «Нужен автоматически действующий руль» — к такому выводу пришел Циолковский. Он придумал специальное устройство — регулятор устойчивого направления оси. Это устройство потребовало от своего создателя неза-

урядной изобретательности. Прежде всего пришлось создать элемент, «чувствовавший» отклонение аэростата от плоскости горизонта. Таким элементом стал физический маятник, выполненный в виде дугообразной трубки, частично заполненной ртутью. Стоило аэростату, а следовательно, и трубке чуть-чуть наклониться, как ртуть замыкала контакты, включался насос, гнавший воду по длинной трубе, проложенной вдоль продольной оси аэростата. Тяжесть воды выравнивала аэростат. И все это происходило само собой, без вмешательства человека

Регулятор устойчивого направления оси К. Э. Циолковского был первым автоматическим пилотом — **автопилотом.** Полвека спустя усовершенствованные автопилоты подняли в небо гигантские самолеты, а чуть позже повели в неизвестные дали космические ракеты и корабли.

Как видим, первый автопилот, описание которого было опубликовано в 1893 г., не имел гироскопа. Но уже через год К. Э. Циолковский предлагает автопилот с гироскопическим чувствительным элементом для самолета (см. эпиграф).

И в третий раз обратился Циолковский к идее автопилота, когда доказал, что единственным средством, способным «умчать» человека в космос, является ракета. Он подчеркивает необходимость автоматизации управления ракетой. Отмечает, что ручное управление ракетой может оказаться не только затруднительным, но и практически невозможным. Размышляя о способах управления ракетой, ученый пишет о гироскопах, приводящих в действие газовые рули. Именно так и управляются современные ракеты.

Умчаться в космос! Высказывая эту мысль, Константин Эдуардович настолько опередил свое время, что пришлось оговориться: «Это моя работа, — писал ученый, — далеко не рассматривает со всех сторон дело и совсем не решает его с практической стороны относительно осуществимости». Да, не пришло еще время космических ракет.

Другое дело, на море.

Авторулевой торпеды

Еще в 1865 г. русский художник-фотограф И. Ф. Александровский, успешно работавший над созданием подводных лодок, изобрел гроз-

ное оружие для них — самодвижущуюся мину. Однако общая техническая отсталость царской России не позволила приступить немедленно к реализации этого важного изобретения.

Через год проект аналогичного подводного снаряда разработал английский инженер Генри Уайтхед. Он же дал ему образное название «торпедо». Латинское слово «торпедо» в переводе означает «электрический скат» — морская рыба, способная передвигаться с большой скоростью и наносить внезапные электрические удары.

Изобретение Г. Уайтхеда в 1866 г. было куплено Австрией, а несколько позднее — Англией и Германией. Россия приобретала у этих стран уже готовые торпеды.

Торпеда Уайтхеда представляла собой продолговатый снаряд, внутри которого размещались взрывчатка и баллоны со сжатым воздухом. Сжатый воздух приводил во вращение движитель торпеды — гребной винт. Торпеда устанавливалась на специальном катере так, что ее продольная ось была параллельна продольной оси катера. Катер выходил на цель (обеспечивая тем самым наведение торпеды) и выстреливал торпеду, которая начинала самостоятельное движение к цели с неуправляемыми, жестко закрепленными рулями.

Убежденным сторонником нового оружия был знаменитый русский адмирал и ученый С. О. Макаров. Под его руководством во время русско-турецкой войны была проведена первая успешная торпедная атака. Ночью 14 (26) января 1878 г. с парохода «Великий князь Константин», которым командовал тогда еще капитан 2-го ранга С. О. Макаров, были спущены минные катера «Синоп» и «Чесма». Пользуясь туманом и беспечностью турок, катера проникли на рейд Батума, где стояла турецкая эскадра, подошли почти вплотную (приблизительно на 50 сажен) к турецкому сторожевому военному кораблю «Интибах» и выпустили торпеды. Атака была успешной, обе торпеды попали в цель.

В дальнейшем торпедные атаки стали менее успешными, так как корабли-цели не стали подпускать так близко к себе минные катера, а атака с большого расстояния, как правило, успеха не приносила — торпеды шли мимо цели. В чем же причина? Как уже было сказано, торпеда Уайтхеда имела неподвижные относительно ее корпуса рули-стабилизаторы. Такая торпеда мог-

ла двигаться по прямой лишь в единственном, идеальном случае, когда толкающая сила движителя точно совпадала по направлению с продольной осью торпеды, а сама продольная ось лежала в плоскости рулей направления. На практике эти идеальные условия, конечно, не выполнялись. В результате сразу после выстрела траектория движения торпеды начинала искривляться, торпеда уходила с линии прицеливания. Чем большее расстояние проходила торпеда, тем больше было ее боковое отклонение от линии прицеливания и тем вероятнее промах. Создавалась тупиковая ситуация, оружие казалось бесперспективным. Помощь пришла неожиданно.

Уайтхед настойчиво, но безуспешно работал над совершенствованием своего детища. Испытания торпед проводились в северной части Адриатического моря. В испытаниях принимал участие лейтенант австрийского флота Людвиг Обри, увлекшийся астрономией. Однажды он встретил сообщение об опытах по обнаружению вращения Земли, которые производил Л. Фуко с прибором, названным гироскопом. «Если гироскоп способен обнаружить медленное вращение Земли, то он непременно должен обнаружить более быстрое вращение торпеды, отклоняющейся от заданного курса, — вероятно подумал Обри. — А если стало известно направление отклонения торпеды, то стало известно и то направление, в котором нужно отклонить руль, чтобы торпеда вернулась на заданный ей курс». Остальное очевидно. Чтобы удержать торпеду на линии прицеливания, нужно поставить на нее гироскоп с тремя степенями свободы, рули торпеды сделать подвижными и управлять положением рулей по сигналам, снимаемым с гироскопа.

Изобретение Обри было быстро реализовано. Вскоре прозрачные воды Адриатического моря прорезала торпеда, путь движения которой не отклонялся в сторону, как это всегда было раньше, а представлял собою волнистую линию в заданном направлении движения. Эту торпеду надежно вел к цели гироскоп.

Схема автоматического рулевого (авторулевого) торпеды, предложенного Обри, представлена на рис 22.

Торпеда имеет четыре руля. Два горизонтальных руля служат для выдерживания движущейся торпеды на заданной глубине. Два вертикальных — рули направления. Они служат для удержания торпеды на заданном курсе. Перемещением двух рулей направления и управ-

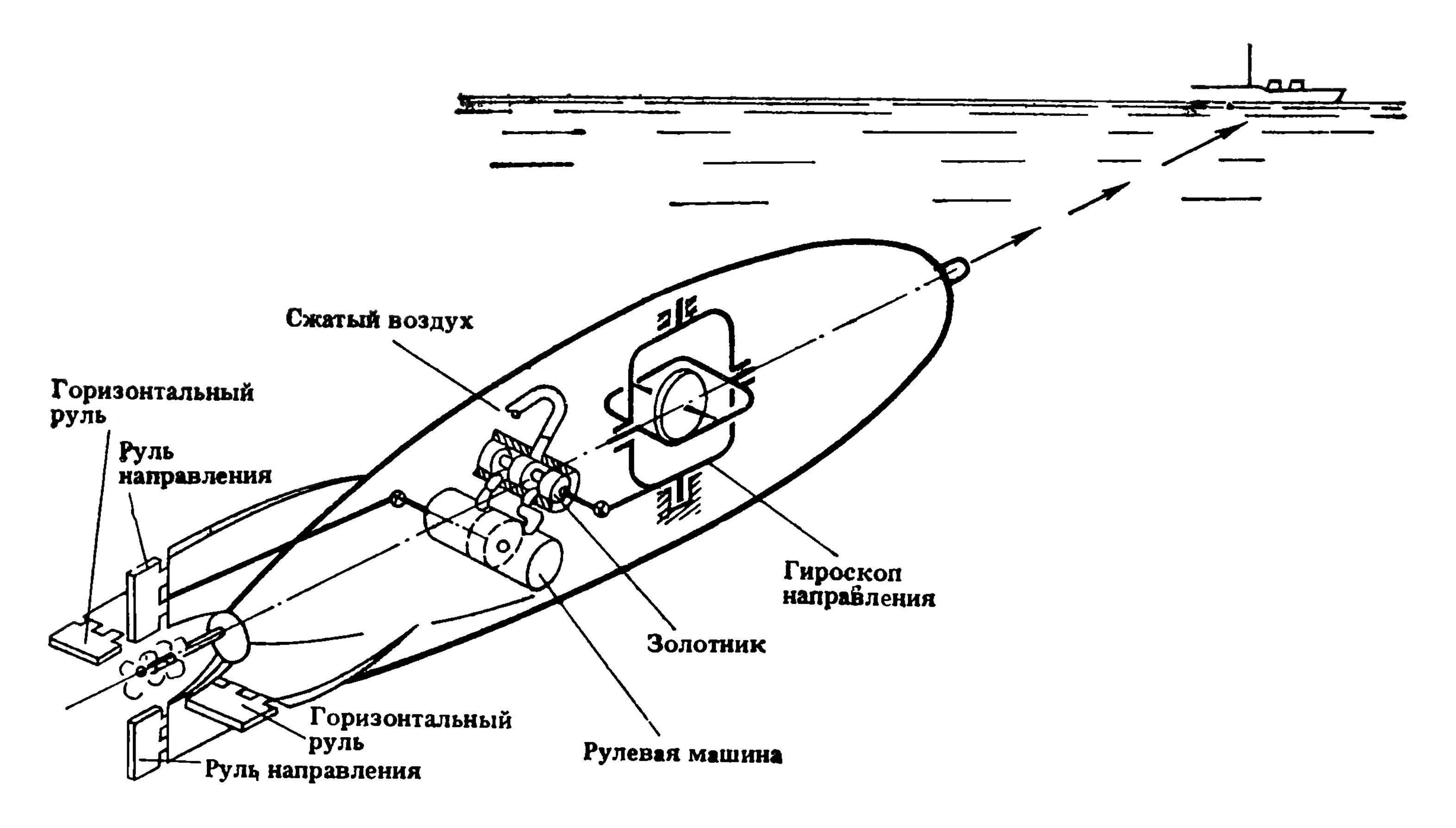


Рис. 22.
Торпеда Г. Уайтхеда с гироскопическим авторулевым

ляет трехстепенной гироскоп, называемый здесь гироскопом направления. Наружное кольцо его карданова подвеса связано тягой со штоком золотника, регулирующего подачу сжатого воздуха в левую и правую части цилиндра пневматической рулевой машины. Предположим идеальное: ось вращения маховика гироскопа в течение всего времени движения торпеды сохраняет неизменным то положение, которое ей было придано при пуске торпеды. Тогда при отклонении торпеды от заданного курса шток золотника, стабилизируемый гироскопом, остается на месте, а корпус золотника переместится вместе с корпусом торпеды. Следовательно, корпус золотника переместится относительно штока. В результате откроется одно из отверстий в корпусе золотника, и сжатый воздух через него устремится в цилиндр рулевой машины. Под действием сжатого воздуха поршень рулевой машины переместится внутри ее цилиндра и повернет на определенный угол рычаг и связанные с ним рули направления. Торпеда начнет возвращаться на заданный курс. Однако, вероятнее всего, на заданном курсе она не удержится, а пройдет это направление по инерции, повернувшись в противоположную сторону. Тогда снова включится авторулевой и снова начнет возвращать торпеду на заданный курс.

Следовательно, торпеда будет идти к цели не по прямой линии, а по волнистой кривой, вьющейся около линии прицеливания. Во времена Обри с этим мирились,

Однако с развитием морской техники рыскание торпеды на курсе стало недопустимым. Чтобы значительно уменьшить углы рыскания, стали применять более сложные схемы авторулевых. Кроме того, современные торпеды оснащены автоматическими системами наведения на цель. В этих системах одним из основных узлов является гиростабилизатор, защищающий от качки чувствительный элемент системы самонаведения — головку самонаведения.

Таким образом, изобретение, казавшееся мертворожденным, обрело грозную силу благодаря гироскопам.

Автопилот

Сын Эльмера Сперри — Лоуренс — был летчиком. Он часто жаловался отцу на недостаточную устойчивость самолетов того времени, на трудность управления ими. Это натолкнуло Э. Сперри на мысль об использовании на самолете гироскопической стабилизации.

К 1914 г. Э. Сперри построил прибор, чувствительный элемент которого состоял из четырех гиромоторов, заимствованных из морского гирокомпаса. Гиромоторы обеспечивали стабилизацию маленькой горизонтальной площадки. Отклонение самолета относительно этой площадки немедленно фиксировалось и выправлялось при помощи рулевых машин, связанных с органами управления самолетом. Таким образом, самолет «следил» за положением горизонтальной площадки, сводя к минимуму углы крена и тангажа.

В 1914 г. во время Всемирной выставки в Париже на гидросамолете, оборудованном гироскопическим стабилизирующим устройством, Лоуренс Сперри совершил полет на высоте 100 м в присутствии группы судей. Его механик вышел на крыло самолета, создав кренящий момент, а сам Лоуренс встал в кабине и поднял руки над головой. Самолет не отклонился от горизонтального положения. Это был первый официально зарегистрированный полет самолета с автоматическим управлением.

Таким образом, автопилот родился из желания облегчить работу пилота. Но уже в то время были люди, которые видели в этом изобретении большие возможности для создания крылатого оружия. Одним из них был «электрический Прометей», знаменитый серб Никола

Тесла, работавший в Америке. Тесла писал: «Существующее радиооборудование позволяет поднять в воздух беспилотный самолет, заставить его лететь по курсу и выполнить задание на расстоянии несколько сот миль от места взлета (хотя, насколько мне это известно, сейчас еще не существует аппаратуры, обеспечивающей телеуправление с удовлетворительной точностью). Я посвятил много лет изучению этой проблемы и разработал способы, позволяющие без труда решать и более сложные задачи».

Если Тесла держал свои планы создания беспилотного самолета в глубокой тайне, то французский инженер В. Лорен, наоборот, активно добивался осуществления аналогичного проекта. Еще в начале первой мировой войны он предлагал для нанесения ударов по отдаленным целям, например, по городам противника, создать беспилотный самолет-снаряд, стабилизируемый с помощью гироскопов и управляемый по радио с сопровождающего пилотируемого самолета.

Таким образом, уже в начале века серьезно ставилась задача автоматического управления беспилотным летательным аппаратом. Было ясно, что летательный аппарат не выполнит своего назначения, если будет лететь к цели по произвольной траектории и кувыркаясь. Для его управления нужно было создать две автоматические системы. Первая должна была удерживать аппарат в определенном положении относительно плоскостей горизонта и меридиана, стабилизировать его положение в полете, то есть сводить к минимуму углы крена, тангажа и рыскания. Вторая система должна была удерживать аппарат на заданной траектории движения. Позже стали говорить, что первая система управляет движением вокруг центра масс, а вторая движением самого центра масс летательного аппарата. Первая система стала называться **автопилотом,** вторая — **автоштурманом.**

У современных летательных аппаратов, как беспилотных, так и пилотируемых, функции автопилота и автоштурмана тесно связаны. Поэтому в последнее время все чаще говорят о единой автоматической системе управления летательным аппаратом.

Поясним устройство и принцип действия самолетного автопилота (рис. 23). Основными блоками автопилота являются: трехосная гироплатформа 1, дающая информацию об углах крена, тангажа и курса (рыскания) са-

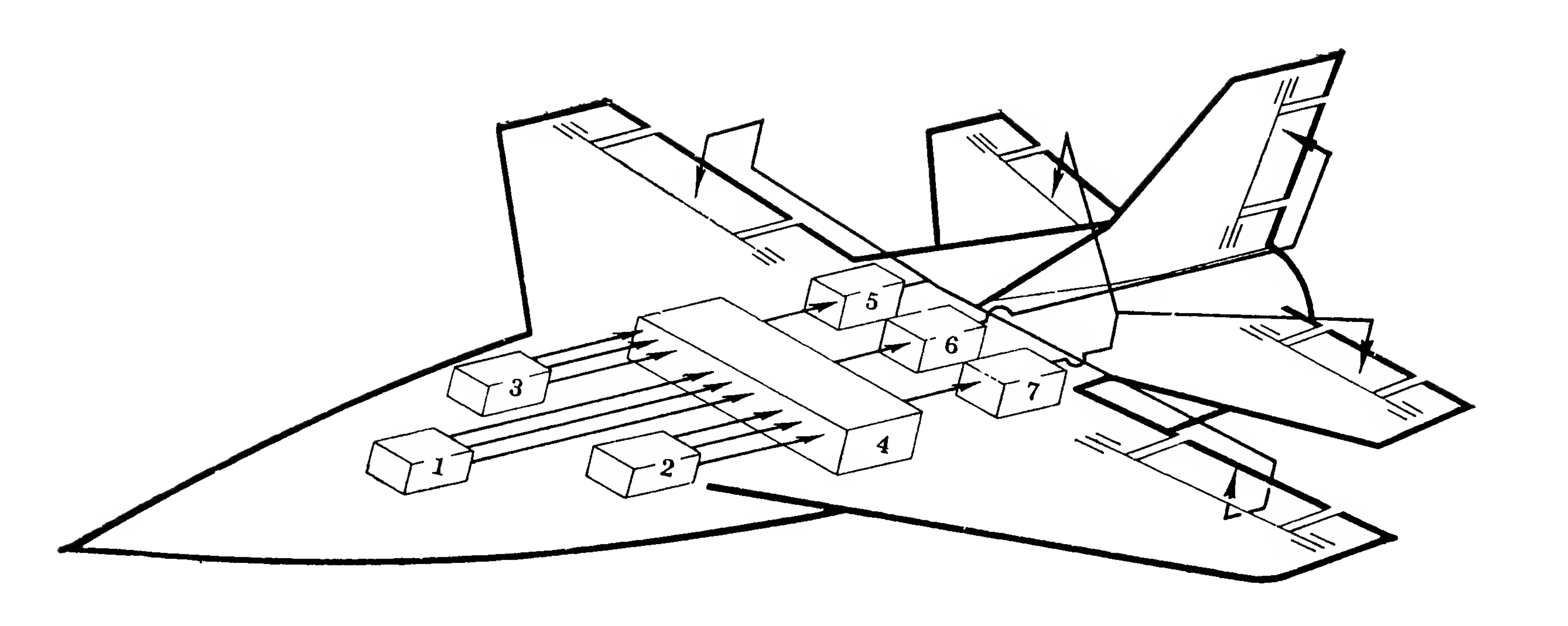


Рис. 23.
Схема современного автопилота

молета; блок 2, состоящий из трех двухстепенных гироскопов, предназначенных для измерения угловых скоростей крена, тангажа и курса; блок 3, содержащий негироскопические датчики полетной информации, например датчики ускорения, скорости, высоты полета, угла атаки и др.; блок 4 — блок обработки информации первичных датчиков (блоков 1, 2, 3); блоки 5, 6, 7 — рулевые машины, поворачивающие рули крена (элероны), тангажа (рули высоты) и курса (руль направления); чаще всего в качестве рулевых машин используются электродвигатели с редукторами, которые с помощью стальных тросов поворачивают рули. Надо сказать, что в первых, простейших автопилотах блок 4 выполнял лишь функции усиления сигналов и их суммирование; в современных автопилотах, кроме указанных простейших функций, этот блок выполняет сложные вычисления, необходимые для снижения ошибок датчиков первичной информации, выбора наиболее выгодных режимов полета, формирования навигационной информации, поэтому в состав блока 4, как правило, входит электронная цифровая вычислительная машина.

Каналы крена, тангажа и курса работают примерно одинаково. Поэтому рассмотрим работу лишь одного канала, например канала тангажа. Предположим, что летящий самолет начал поворачиваться вокруг поперечной оси, поднимая нос. Этот поворот необходимо как можно скорее прекратить, так как в противном случае самолет наберет высоту и выйдет из своего высотного

эшелона, что категорически запрещается правилами воздушного движения.

Отклонение самолета по углу тангажа от заданного значения будет зафиксировано тангажным датчиком команд гироплатформы, который выдаст электрический управляющий сигнал Этот сигнал, усиленный и при необходимости обработанный в блоке 4, поступит на рулевую машину 7, ротор рулевой машины начнет вращаться, тросы натянутся и повернут (в данном случае опустят) рули высоты. Набегающий поток воздуха, ударяясь в опущенные рули высоты, создаст момент, выравнивающий самолет.

Однако массивный самолет, поворачиваясь под действием руля высоты, по инерции пройдет горизонтальное положение и отклонится в противоположную сторону. Снова включится автопилот и заставит его двигаться в обратном направлении, уменьшая угол тангажа. Если не принять специальных мер, то самолет начнет совершать колебания вокруг поперечной оси. Эти колебания в полете недопустимы. Их нужно успокаивать (демпфировать).

Чтобы успокаивать колебания самолета, в каждый канал автопилота вводится еще по одному гироскопическому чувствительному элементу, называемому датчиком угловой скорости, или демпфирующим гироскопом.

Гироскопические датчики угловой скорости используют свойства гироскопа с двумя степенями свободы, принцип действия которых подробно описан ранее в главе «Гироскоп поднимается в небо».

Итак, если с помощью гироплатформы измеряются углы отклонения самолета от заданного положения, то двухстепенной (демпфирующий) гироскоп чувствует тенденцию к отклонению — угловую скорость отклонения самолета от заданного положения. Это очень важно, так как эффективный управляющий сигнал с демпфирующего гироскопа можно получить и подать на рулевую машину намного раньше, чем с гироплатформы, которая выдает управляющий сигнал лишь после того, как уже накопится достаточно большой угол отклонения

Говорят, Наполеон однажды изрек· «Управлять — значит предвидеть». Использование в каналах автопилота опережающего сигнала с демпфирующего гироскопа приводит к успокоению колебаний самолета, к улучшению качества управления.

Гироскопы на ракете

Как видим, идеи Циолковского живут и развиваются: «маленький быстровращающийся диск» ведет в небо могучие летательные аппараты. Но еще при жизни Константина Эдуардовича стало известно, что его великие идеи используются в военных целях. Это угнетало ученого, и он горестно писал: «И вот всесветные акулы (как называет Эдисон похитителей чужих мыслей) уже успели отчасти подтвердить мои идеи и, увы, уже применить их к разрушительным целям. Я не работал никогда над тем, чтобы усовершенствовать способы ведения войны. Это противно моему христианскому духу.

Работая над реактивными приборами, я имел мирные и высокие цели: завоевать вселенную для блага человечества, завоевать пространство и энергию, испускаемую солнцем... Акулы распоряжаются и преподносят, что и как хотят: вместо исследования неба — боевые снаряды, вместо истины — убийство».

Вечером 8 сентября 1944 г. в Лондоне в городском парке Чизвик с громовым раскатом взорвалась первая баллистическая ракета Фау-2. А всего через восемь месяцев ее создатели — около 500 ведущих фашистских специалистов ракетного конструкторского бюро во главе с Дорнбергером и Брауном, спасаясь от наступающей Советской Армии, бежали на запад Германии и там в местечке Оберйох сдались в плен американским войскам. С тех пор ракетно-ядерное оружие стало грозить народам мира из-за океана, началось время «холодной войны», атомного шантажа. Первые советские баллистические ракеты P_1, P_2 и другие были оснащены ядерными зарядами, мощными реактивными двигателями, точнейшими гироскопическими системами управления.

Не ослабляя оборонного могущества страны, советские люди работали и над осуществлением светлых идей К. Э. Циолковского. Во главе этих работ стоял академик Сергей Павлович Королев. Многие достижения ракетной техники и космонавтики связаны с его именем Работа была необъятной, «не по плечу одному». Сергей Павлович умел создавать особый дух коллективизма, ответственности, принципиальности, умел решать непростую задачу формирования общих позиций «могучей кучки» — своих первых соратников — главных конструкторов

двигателей, систем автономного управления, систем радиоуправления, гироскопических приборов, наземных комплексов.

...Не могли спать в эту ночь ни Королев, ни Глушко, ни Пилюгин, ни другие главные конструкторы, ни члены государственной комиссии: шагают по шпалам, провожают к стартовой площадке первую космическую ракету с первым искусственным спутником Земли. И вот наконец: три... два... один... пуск! Плавно уходит в небо ракета-носитель. Сначала она движется вертикально вверх, а затем, достигнув определенной высоты и скорости, поворачивается вокруг оси тангажа так, что ее продольная ось становится почти горизонтальной. К этому моменту времени ракета и спутник имеют уже первую космическую скорость — 8 км/с. Открываются створки обтекателя, спутник отделяется и начинает самостоятельный полет.

Но прежде чем открылись створки обтекателя, сложнейшие устройства выполнили ответственную работу. Еще на пусковом столе они произвели начальную ориентацию ракеты-носителя — выставили ее по вертикали и развернули в азимуте относительно плоскости меридиана на заданный угол. В полете они удерживали ракету-носитель на заданном направлении движения, непрерывно измеряли скорость и по достижении заданной скорости произвели поворот ракеты-носителя.

На всех этапах управления ракетой основную роль играли гироскопические приборы. Точнейшая (точность порядка десятков угловых секунд) ориентация ракеты в азимуте производилась с помощью наземного гироскопического компаса. Удержание ракеты-носителя на заданном направлении движения осуществлялось гироскопической системой стабилизации — автопилотом.

Принцип действия автопилота уже пояснялся. Теперь познакомимся с тем, как осуществляется программный поворот ракеты-носителя вокруг тангажной оси. Этот маневр ракеты выполняется также с помощью гироскопического прибора. Таким прибором может быть трехосная гиростабилизированная платформа или отдельный прибор — **гирогоризонт.**

Ракетный гирогоризонт (рис. 24) представляет собою гироскоп с тремя степенями свободы, центр масс которого лежит в точке пересечения осей карданова подвеса, а ось вращения маховика горизонтальна. Прибор ус-

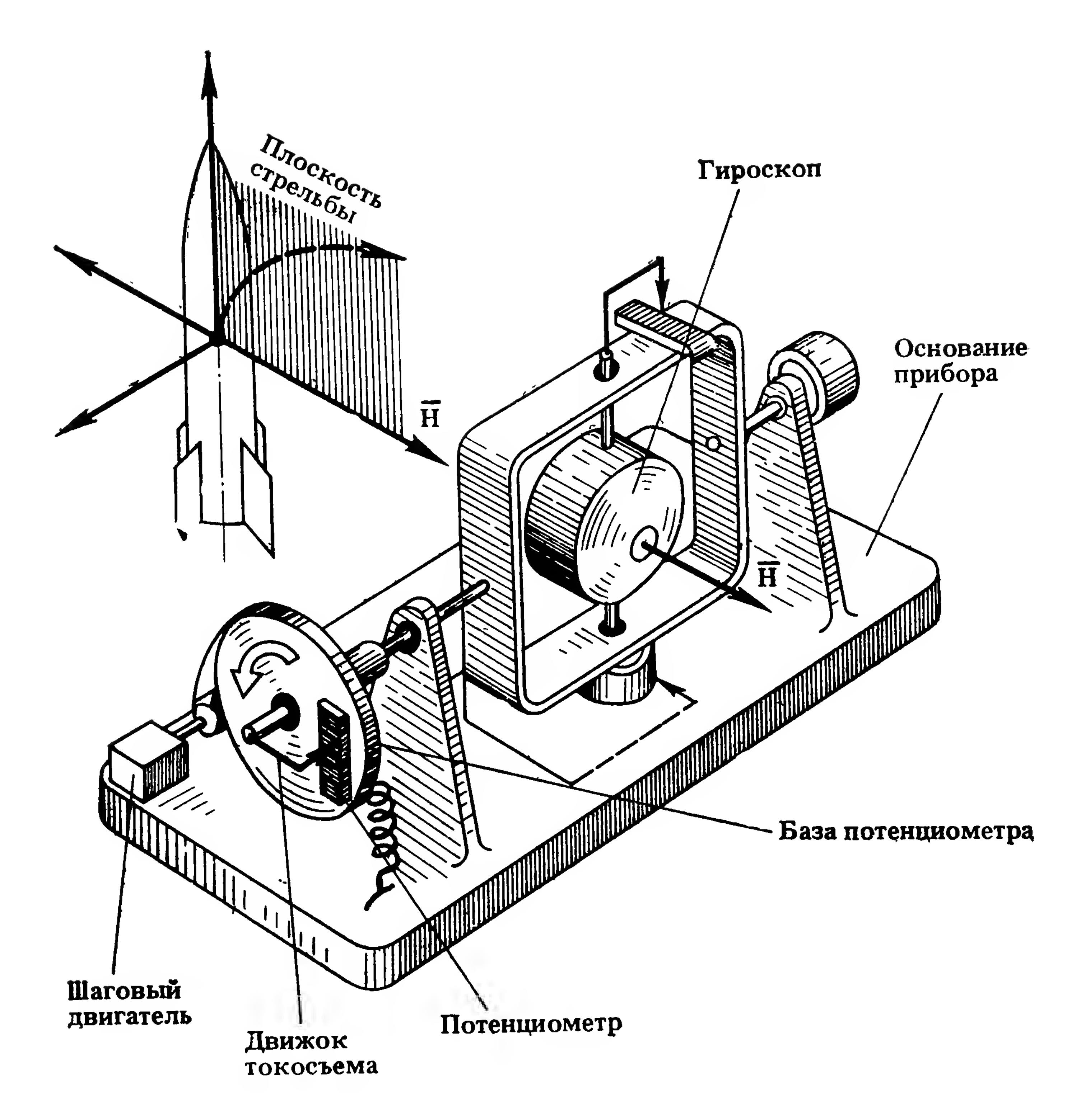


Рис. 24.
Схема ракетного гирогоризонта

танавливается на ракете так, что ось наружного кольца карданова подвеса лежит в плоскости горизонта и параллельна тангажной оси ракеты, а ось внутреннего кольца карданова подвеса вертикальна и параллельна продольной оси ракеты. Съем информации об угле тангажа ведется с помощью потенциометрического датчика угла.

Потенциометрический датчик угла состоит из двух основных деталей: из однослойной обмотки, намотанной на каркас очень тонким золотым проводом (потенциометр), и движка токосъема, который может скользить по потенциометру. Потенциометр включается в электрическую цепь. Если движок стоит точно в центре потенциометра, то выходного сигнала нет. Если потенциометр

сместился относительно движка, то возникает электрический сигнал, соответствующий величине и направлению смещения.

Движок токосъема укрепляется на наружной оси карданова подвеса, и следовательно, стабилизируется гироскопом. Потенциометр канала тангажа укрепляется на специальной базе. Эта база устанавливается на основание прибора так, что она может быть либо жестко связана с основанием, либо с помощью специального программного механизма повернута вместе с потенциометром на определенный угол относительно основания.

Пока ракета летит вертикально, база тангажного потенциометра жестко связана с основанием прибора. В этом случае потенциометрический датчик угла фиксирует нежелательные отклонения ракеты по углу тангажа и посылает управляющие сигналы на рули ракеты. Под действием рулей ракета поворачивается вокруг тангажной оси, возвращаясь на заданную траекторию. Работает система удержания (стабилизации) ракеты на заданной траектории полета.

Эта система выводит ракету-носитель точно в заданный район околоземного пространства, после чего включается цепь электрического питания программного механизма гирогоризонта. Программный механизм поворачивает базу, а следовательно, и тангажный потенциометр относительно основания гирогоризонта, укрепленного на корпусе ракеты. База поворачивается программным механизмом на угол, который с высокой точностью равен требуемому углу поворота ракеты. Направление угла поворота базы противоположно требуемому направлению поворота ракеты (направления поворотов базы и ракеты показаны на рис. 24 стрелками).

В результате поворота базы тангажный потенциометр переместится относительно движка токосъема, который сохранит прежнее положение, так как стабилизирован гироскопом. С тангажного потенциометрического датчика угла на рули ракеты пойдет управляющий сигнал. Под действием рулей ракета начнет поворачиваться вокруг своей тангажной оси. Поворачиваясь сама, ракета будет поворачивать вокруг оси наружного кольца карданова подвеса основание гирогоризонта и базу с тангажным потенциометром. Этот поворот будет происходить до тех пор, пока не исчезнет управляющий сигнал, то есть пока центральная точка тангажного потенцио-

метра снова не совместится с движком токосъема. Когда это произойдет, управляющий сигнал исчезнет, поворот ракеты прекратится, но она, продолжая полет, окажется повернутой на требуемый угол тангажа.

Вот так «маленький быстровращающийся диск» управляет полетом большой ракеты-носителя.

Маховик — руль космического корабля

Космические летательные аппараты (КЛА) — спутники, орбитальные станции, межпланетные космические корабли, хотя и движутся в сильноразреженной среде, все равно испытывают действие возмущающих сил. К таким силам относятся: изменения величины и направления гравитационной силы притяжения КЛА к Земле, возникающие вследствие несферичности Земли и гравитационных аномалий; силы взаимодействия магнитных масс, расположенных на борту КЛА с магнитным полем Земли и других планет; давление солнечных лучей и т. д.

Эти силы по нашим земным представлениям невелики, но вполне достаточны, чтобы вызвать изменение ориентации корпуса КЛА, не имеющего в условиях космического вакуума (в отличие от самолетов и морских судов) каких-либо естественных стабилизирующих свойств.

Произвольное изменение ориентации корпуса КЛА недопустимо, так как вместе с ним изменилась бы ориентация осей чувствительности научной и информационной аппаратуры, установленной на нем. Стало быть, и КЛА нуждается в системе автоматической стабилизации и управления.

Принцип построения этой системы тот же, что и для других летательных аппаратов. Система включает в себя блок элементов, чувствующих отклонение КЛА от заданной ему ориентации (среди этих элементов основное место занимают гироприборы — гироорбитанты, гиростабилизированные платформы, гироскопические датчики угловых скоростей); блок обработки иформации чувствительных элементов; блок силового воздействия на КЛА с целью его выравнивания.

О гироприборах уже подробно говорилось ранее, описание блока обработки информации в тему книги не вхо-

дит. А вот на реализации устройств силового воздействия на КЛА стоит остановиться несколько подробнее.

Проблема не из простых. Дело в том, что в космосе не могут быть использованы устройства типа аэродинамических рулей самолетов — нет воздушной среды. Управляющие устройства типа миниатюрных реактивных двигателей или сопел, выбрасывающих сжатый газ, непрактичны — запас горючего или сжатого газа на КЛА всегда ограничен. Поэтому разработчики систем стабилизации на некоторых типах КЛА (орбитальная станция «Салют-5», спутники типа «Метеор») реализовали еще одну остроумную идею К. Э. Циолковского, высказанную им еще в 1883 г. в знаменитой работе «Свободное пространство».

Сущность идеи заключалась в том, чтобы прикладывать к корпусу КЛА управляющие силы и моменты, изменяя скорости движения масс, находящихся внутри КЛА.

Управляющие моменты могут создаваться с помощью маховиков, оси вращения которых укреплены в корпусе КЛА, а сами маховики могут приводиться во вращение электродвигателями, получающими управляющие сигналы от гироскопических приборов. В таком «космическом» руле используется третий закон Ньютона: действие равно противодействию. Когда на электродвигатель подается управляющий электрический сигнал, то маховик начинает вращаться. Вращаясь, он с помощью магнитных силовых линий как бы отталкивается от статора и тем самым прикладывает к нему момент противодействия. Поскольку статор электродвигателя жестко укреплен на корпусе КЛА, то ему передается момент противодействия. Это и есть управляющий момент системы ориентации и стабилизации КЛА. Для его создания, то есть для запуска электродвигателя, нужна электрическая энергия. Ее запасы на борту КЛА могут постоянно пополняться с помощью солнечных батарей, что удачно решает проблему энергоснабжения привода руля КЛА.

Один маховик создает момент вокруг одной оси корпуса КЛА, но стабилизировать корпус КЛА нужно относительно трех осей. Что же, ставить три маховика и три электродвигателя? Сложно, громоздко, дорого.

Советские инженеры нашли оригинальное решение проблемы. Вместо трех отдельных маховиков они приме-

нили один маховик в виде шара, изготовленного из электро- и магнитопроводящего материала.

Маховик-шар помещался в корпус, имевший сферическую полость. Корпус жестко связывался с корпусом КЛА. На поверхности сферической полости были размещены обмотки электромагнитов и обмотки электродвигателей. При подаче питания на обмотки электромагнитов создавались радиальные силы, которые удерживали маховик-шар в центральном положении относительно поверхности сферической полости и тем исключали механический контакт между шаром и полостью. При подаче питания (управляющих сигналов) на обмотки электродвигателей маховик-шар приводился во вращение сразу или поочередно вокруг трех взаимно перпендикулярных осей. Возникавшие при вращении маховика моменты противодействия передавались корпусу КЛА, придавая ему требуемую ориентацию.

В космическом комплексе «Салют-5» — «Союз-24» был применен маховик-шар, имевший диаметр 60 см и массу около 100 кг. Несмотря на большую массу маховика, центрирующие силы магнитного подвеса были небольшими, так как маховик работал в условиях невесомости.



«ПРИБОРЫ НЕ ПОЗВОЛИЛИ НАМ ЗАБЛУДИТЬСЯ»

ГЛАВА 7

. . . Решение навигационных задач не менее важно для современных подвижных объектов, чем вопросы создания современных конструкций двигателей и т.п.

*Ч. Дрейпер, У. Ригли**

Развитие методов и средств неавтономной навигации. Использование явления инерции для построения полностью автономных навигационных систем — инерциальных систем. Проблемы инерциальной навигации и методы их решения.

Древнее искусство навигации

Далекий уже 1977 г. Космонавты Ю. Романенко и Г. Гречко на орбитальной станции «Салют-6» совершают свой рекордный по длительности 96-дневный полет. В одной из телевизионных передач с орбиты Гречко, отмечая надежную работу навигационной системы станции, сказал: «Если вы сейчас видите нас и слышите, значит... приборы не позволили нам заблудиться».

Заблудиться. Каждый из нас с детства знаком с этим словом и чаще всего связывает его с лесом.

Однако это слово имеет более широкий смысл. Откроем Толковый словарь В. И. Даля, читаем: «Заблудиться — сбиться с пути...»

Да, путей у человека и человечества множество, и не только в лесу. Прежде чем подняться в космос, люди на-

* Крупные американские специалисты в области гироскопического приборостроения и систем навигации.

чали передвигаться по Земле, потом по рекам и около берегов морей и, наконец, вышли на просторы водного и воздушного океанов.

Какую же информацию должен иметь человек — пешеход или водитель транспортного средства, чтобы не заблудиться? Как минимум следующую: человек должен знать, где он находится в данный момент времени, то есть отчетливо представлять себе (отметить на карте) свое местонахождение относительно известных ему опорных ориентиров, — знать координаты своего местонахождения; в каком направлении относительно какого-либо опорного направления, например, плоскости меридиана, ему нужно двигаться дальше — знать курс движения.

О том, как с помощью приборов — магнитного компаса и курсовых гироскопических приборов — определяется направление движения, уже говорилось. Теперь расскажем о том, как определяются координаты местонахождения движущегося объекта.

Впервые особенно остро проблемы определения координат местонахождения и курса встали в мореплавании, где основным средством передвижения был navig, что в переводе с латинского значит «корабль». Выйдя в открытое море, где «только волны да ветер вокруг», корабль мог легко заблудиться и погибнуть. Поэтому с древних времен искусство кораблевождения — navigato (навигация) — считалось почетным, ответственным и очень важным. Человек, владевший этим искусством, назывался штурманом.

С течением времени и развитием техники навигационные задачи (определение координат и курса) остро встали и во многих других областях — в авиации, в наземном транспорте (боевые бронемашины, вездеходы, сельскохозяйственные машины), в ракетной технике, на космических летательных аппаратах. Решая эти задачи, специалисты не стали изобретать новых терминов, а воспользовались древним словом «навигация» и «молодыми» прилагательными. Вот почему все привычнее становится сочетание слов: «воздушная навигация», «наземная навигация», «космическая навигация».

Чтобы не сбиваться с пути, древние путешественники пользовались системой естественных и искусственных вех-ориентиров: гора, большой камень, залив, поляна, отдельное дерево, курган и т. д. Опознавая вехи, они оп-

ределяли свое местоположение и направление дальнейшего движения.

Этот «опознавательный» метод навигации позднее был назван обзорно-сравнительным. Его достоинство — высокая точность определения местонахождения. Его недостатки:

— необходимость предварительной подготовки трассы — установка или разведывание ориентиров;

— ограниченность — всю поверхность Земли ориентирами не покроешь;

— неавтономность — необходимость визуального или какого-либо другого контакта с ориентирами; причем этот контакт может быть легко прерван — ориентиры разрушены или временно закрыты туманом, пылью, дымом.

Обзорно-сравнительный метод навигации обычно используется прерывисто, когда в поле зрения штурмана (или автоштурмана) появляется ориентир.

Этот метод, как и другие методы навигации, в настоящее время интенсивно развивается и совершенствуется. Выбираются достаточно надежные ориентиры, например участки звездного неба (для навигационных систем космических кораблей) или характерный рельеф местности (для наземного транспорта и самолетов). Разрабатываются специальные приборы, опознающие эти ориентиры, и автоматические системы, ведущие обработку приборной информации.

Пока корабли плавали вдоль берегов, обзорно-сравнительный метод «работал» достаточно хорошо. Но вот в конце XV в. европейцы начали искать более короткий, чем вокруг Африки, путь в Индию. Отважные мореплаватели отправлялись на Запад, в открытый океан. Как ориентироваться здесь? Ведь в океане вех-ориентиров нет. И тогда вспомнили о предложении Птолемея, о его условной широтно-долготной системе координат. С тех пор одной из основных задач навигации становится определение географических координат местонахождения корабля — его широты φ и долготы λ.

Астрономические методы определения широты были известны давно и с успехом использовались в навигации. Например, простейший способ определения широты — измерение угломерным прибором высоты Полярной звезды.

С определением долготы дело обстояло значительно сложнее.

К началу эпохи великих географических открытий, когда особенно остро встала проблема определения долготы, был известен лишь один метод ее определения. Не будем подробно его пояснять, скажем только, что для реализации этого метода нужно было, находясь на корабле, одновременно определить местное время на меридиане, принятом за начальный, и местное время на меридиане, где находился корабль. Долгое время никто не мог предложить практически приемлемых приборов для решения этой задачи. И тогда «сильные мира» того, жаждавшие захвата новых земель, стали назначать большие денежные вознаграждения (долготные призы) за «открытие долготы». Это породило ажиотаж вокруг серьезной проблемы, но и, несомненно, способствовало ее разрешению.

Около трех веков — с XVI по XVIII — проблема определения долготы стояла остро и занимала умы множества людей — выдающихся ученых, среди которых были Галилей, Ньютон, Эйлер, Ломоносов. Множество астрономов и изобретателей предлагали методы и инструменты для определения долготы и пытались получить «долготные призы», писатели и художники отражали «долготные страсти» в своих произведениях.

Проблема определения долготы оказала непосредственное влияние на создание Королевского общества в Англии и Французской академии наук, на открытие Гринвичской и Парижской обсерваторий, на разработку теории движения небесных тел и создание на ее основе «Морского альманаха» — астрономического справочника для штурманов, на разработку точных навигационных приборов — секстанта и хронометра. Кстати, за создание морского хронометра — механических часов, имеющих высокую точность хода, несмотря на качку корабля, смену жары и холода, влажности и сухости, английский парламент выплатил в 1773 г. большую «долготную премию» своему соотечественнику Джону Гаррисону по прозвищу Долгота, который всю жизнь занимался созданием этих приборов.

Во второй половине XVIII в. морские хронометры были созданы и во многих других странах. В России М. В. Ломоносов, много работавший над проблемами навигации, предложил в 1759 г. часовой механизм, в котором

удалось «отвратить... помешательство часов от шатания корабля».

Морской хронометр замечателен еще и тем, что является автономным навигационным прибором, то есть прибором, для работы которого нет никакой необходимости в контактах с внешним миром. Однако в целом метод определения долготы по разности времен не был автономным, так как местное время на меридиане корабля определялось астрономическим способом и только время начального меридиана (например, Гринвичского) определялось автономно хронометром.

Проблема определения географических координат корабля в открытом море к концу XVIII в. принципиально была решена, но само определение координат было трудоемко и неудобно, так как в его основе лежали астрономические наблюдения. Кроме того, координаты корабля определялись лишь в отдельные моменты времени, непрерывной информации о его местоположении не было. С этим мирились, пока скорости кораблей были небольшими, жесткого расписания движения не было, морские и воздушные границы, которые из-за несовершенной навигации могли быть нарушены, не существовали. Все эти проблемы появятся значительно позже. В результате возникнет острая необходимость в постоянном контроле за местоположением корабля, а позднее и самолета.

В конце 20-х гг. начинают развиваться автоматические навигационные системы, использующие метод счисления пути, позволяющий получать непрерывную информацию о местонахождении движущегося объекта. Сущность метода состоит в измерении (по-морскому — в счислении) пройденного расстояния в известном (по компасу) направлении. Зная координаты начальной точки маршрута и пройденный путь в известном направлении, можно определить и отметить на карте новое положение движущегося объекта.

Первые упоминания об этом методе относятся к временам «долготной лихорадки» и связаны с именем Андре Рейснера, немца из Нойштата, который явился к Людовику XIV с непогрешимым, по его мнению, решением проблемы долготы при помощи прибора одометра — счетчика пройденного кораблем пути. Король обещал щедро наградить Рейснера, но при условии, что эффективность его изобретения подтвердит авторитетная комиссия. Заключение комиссии было отрицательным:

«...даже обещанные сто шестьдесят тысяч ливров не смогли вдохновить его (Рейснера) на ответы, которые могли бы опровергнуть выдвинутые против его изобретения возражения». Результат закономерен, так как для успешной реализации метода требовалась его детальная теоретическая проработка и, что самое главное, приборы, с высокой точностью определяющие курс и пройденное расстояние.

В первых навигационных системах счисления пути использовался простой прием: для определения пройденного расстояния скорость судна умножалась на время движения с этой скоростью. Скорость судна измерялась с помощью прибора, который называется лагом. Помните, у Жюль Верна: «Для приблизительного определения пути, пройденного «Пилигримом», пятнадцатилетний капитан... приказал бросать лаг каждые полчаса и записывать показания прибора».

Однако точность определения пройденного расстояния таким способом была невысокой. Объяснялось это двумя причинами. Во-первых, в течение получаса, когда скорость корабля не контролировалась, она могла быть совершенно иной, чем в момент измерения. Во-вторых, лаг, а позднее и измеритель воздушной скорости в авиации работали на принципе измерения скорости движения среды (воды, воздуха) относительно корпуса движущегося объекта (корабля, самолета). Использование этого принципа давало неплохие результаты, если сама среда была неподвижна относительно поверхности Земли, то есть отсутствовало течение воды, не было ветра. В этом случае скорость набегавшего на объект потока воды или воздуха, возникающего в результате движения объекта, была равна скорости движения объекта относительно поверхности Земли, и измерение скорости происходило достаточно точно. Но это особый маловероятный случай навигации. Обычно скорость движения среды есть, и она непостоянна — меняет и величину, и направление, то есть «склонна к измене и перемене».

Конечно, движение самой среды вносит погрешности в работу лага и измерителя воздушной скорости. Учесть изменчивое движение самой среды, особенно воздуха, достаточно трудно. Поэтому навигационные системы, работающие на принципе измерения скорости движения среды относительно объекта, имеют невысокую точность.

Принцип измерения скорости объекта путем измере-

ния скорости движения среды относительно него имеет и еще один серьезный недостаток — необходимость контакта со средой. Это значит, что для реализации принципа нужно иметь приборы, вынесенные за пределы объекта, в среду, и, кроме этого, принцип не «работает», если нет самой среды (например, в космосе).

С появлением и развитием радиотехнических систем возможности навигации возросли многократно. Были созданы весьма совершенные радионавигационные системы, реализующие как позиционный метод путем пеленгации радиостанций (радиомаяков), так и метод счисления пути. Однако радионавигационные системы также до конца не решили проблем навигации, так как они имеют существенные недостатки: не автономны, а следовательно, подвержены естественным и искусственным помехам; излучая радиосигналы, объекты обнаруживают (демаскируют) себя, что крайне опасно в военное время.

Таким образом, навигационные системы, построенные на описанных принципах, хотя и находят широкое применение, но обладают серьезным недостатком — они не автономны. А это значит, что работа таких систем в любой момент времени может быть нарушена естественными или искусственными помехами.

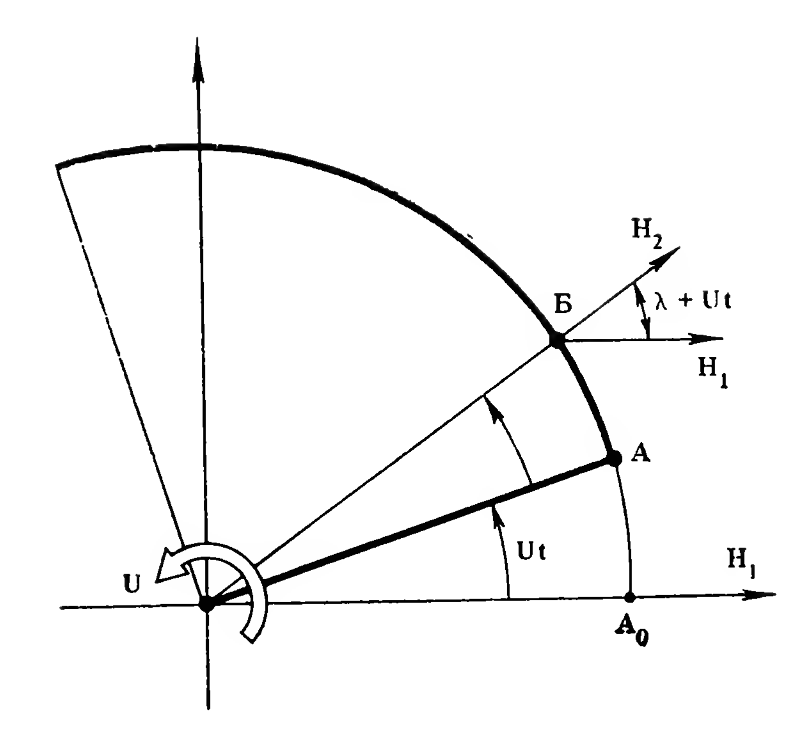
Многие поколения моряков и летчиков мечтали о навигационной системе, работа которой не зависела бы от видимости звезд и земных ориентиров, от капризов погоды и искусства штурмана. Долгое время эта проблема казалась неразрешимой...

И снова «идея граничит с безумием»

Первый гироскопический прибор для полностью автономного определения широты — гирошироот — предложил сам Л. Фуко. Об этом приборе уже говорилось.

Хотя принципиальное решение задачи изящно и были многочисленные попытки создать гирошироот, идея Л. Фуко не реализована до сих пор: даже современная техника пока не обеспечивает требуемой инструментальной точности прибора.

Первые предложения по созданию полностью автономных гироскопических навигационных систем стали по-



являться в самом начале XX в. Так, М. Керри получил патент с приоритетом от 1903 г., Р. Руссов — от 1905 г., В. В. Алексеев получил привилегию в России № 28451 с приоритетом от 1911 г.

Рис. 25.
Схема определения долготы инерциальной системой геометрического типа

Сущность предложений американского и русского изобретателей М. Керри и В. В. Алексеева сводилась к тому, чтобы на корабле или летательном аппарате иметь гироскопическое устройство, которое решало бы следующие задачи: в начальной точке маршрута определяло бы направление вертикали в абсолютном пространстве и сохраняло это начальное направление на все время движения; в произвольной точке маршрута также определяло бы направление вертикали, измеряло угол между направлениями этих вертикалей и на основании данного измерения вычисляло географические координаты.

Сложно? Да, непросто. Но вот простая иллюстрация метода (рис. 25). Предположим, что по экватору Земли из точки A_0 в точку *Б* движется корабль. Поскольку корабль движется по экватору, то широта его не меняется и равна нулю. Поэтому его положение на маршруте характеризуется одной координатой — долготой λ. Покажем, как с помощью предложенного метода можно найти эту координату. Пусть для простоты в момент начала движения корабль находился на Гринвичском меридиане в точке A_0. В этот момент на корабле запускается гироскоп с тремя степенями свободы; ось маховика гироскопа (вектор H_1) выставляется по вертикали в точке A_0. Как было отмечено раньше, идеальный гироскоп с тремя степенями свободы сохраняет неизменным направление оси вращающегося маховика в абсолютном пространстве при любом движении основания, на котором он установлен. Поэтому направление оси маховика гироскопа (вектора H_1) будет сохраняться в любой точке маршрута, то есть гироскоп «запомнил» начальное направление. Далее корабль начал движение. Это движе-

ние сложное: корабль вращается в абсолютном пространстве вместе с Землей с угловой скоростью U и движется относительно ее поверхности. В результате последнего движения происходит изменение положения корабля на поверхности Земли (изменение его долготы λ). Пусть требуется узнать место нахождения корабля по истечении промежутка времени t.

За это время Земля повернется на угол Ut, а корабль пройдет расстояние, соответствующее приращению долготы λ. В момент времени t с помощью другого гироскопического прибора (гиромаятника, гировертикали), имеющего кинетический момент H_2, определяется направление вертикали в точке *Б*, координата которой λ пока еще неизвестна. Таким образом, в точке *Б* имеются два направления, материализованных с помощью осей маховиков гироскопов: направление вертикали H_1 в начальной точке маршрута A_0 и направление вертикали H_2 в произвольной точке маршрута *Б*. С помощью элементарной геометрии доказывается, что угол между направлениями вертикалей равен сумме углов λ и Ut. Следовательно, чтобы определить местонахождение корабля (координату λ), нужно измерить угол между осями вращения маховиков гироскопов и вычесть из него угол поворота Земли Ut. Определить угол поворота Земли несложно, так как скорость вращения Земли известна, а время движения корабля t с высокой точностью определяется с помощью хронометра.

Итак, координата нового местоположения корабля — его долгота λ определена и, что особенно важно, определена приборами (гироскопами и часами), которые для своей работы не требуют каких-либо контактов с миром, находящимся за бортом движущегося объекта, то есть определена автономно.

Если теперь мысленно заставить корабль двигаться вдоль меридиана, то его долгота изменяться не будет, а будет меняться только широта φ. Широта нового местонахождения корабля может быть также определена описанным выше способом с помощью двух гироскопических приборов.

Если корабль движется в произвольном направлении и при этом одновременно меняются его широта и долгота, то описанный метод навигации принципиально также «работает». Но в этом случае пояснение принципа

действия навигационной гироскопической системы было бы более сложным и менее наглядным.

Здесь важно подчеркнуть, что предложенный метод навигации совершенно не нуждался во внешних контактах, то есть являлся полностью автономным, а потому перспективным. Позже этот метод навигации был назван инерциальным, а многочисленные системы, реализующие инерциальный метод, стали называться инерциальными системами навигации.

Как следует из описания схемы навигационной системы, в основе ее лежат геометрические построения (материализация направлений) и простейшие геометрические измерения (измерение углов между осями вращения маховиков гироскопов). Поэтому позднее навигационные системы, реализовавшие эту схему, были названы инерциальными системами геометрического типа

Однако ждать реализации пришлось очень долго, почти полвека. Лишь в 1959 г. стало известно, что одна из первых американских атомных подводных лодок «Наутилус» совершила длительный подводный рейс, во время которого ориентировалась с помощью инерциальной навигационной системы геометрического типа. Почему же так долго пришлось ждать? Потому, что сначала идея инерциальной навигации показалась нереальной. Простые вычисления убеждали в этом. Первые энтузиасты инерциальной навигации решили следующую простую задачу, надолго охладившую их пыл. С какой точностью гироскопы должны выдерживать начальное направление в абсолютном пространстве и определять направление вертикали в произвольной точке маршрута, чтобы погрешность определения координат после одного часа движения корабля не превышала одной морской мили? Морская миля или просто миля — удобная общепринятая единица измерения расстояния в морской навигации. Если считать Землю идеальным шаром, то в угловой мере одна миля равна одной угловой минуте широты, что соответствует 1,82 км.

Итак, если требуется определить новое местонахождение корабля с точностью около 2 км (одна миля), то это значит, например, что за час движения гироскоп, сохраняющий начальное направление, должен отклониться от него не более чем на 0,5 угловой минуты, а гироскоп, определяющий направление вертикали в новой точке, должен определять ее с точностью также не хуже 0,5 угло-

вой минуты. В этом случае суммарная ошибка измерения угла между осями вращения маховиков гироскопов не превзойдет 1 угловой минуты и будет обеспечена заданная точность.

Но что значит «гироскоп, сохраняющий начальное направление, должен отклоняться от него не более чем на 0,5 угловой минуты?» Это значит, что гироскоп должен иметь самопроизвольную угловую скорость прецессии (дрейф) менее чем $\frac{0,5 \text{ угл. мин}}{1 \text{ ч}} \approx 0{,}0085°/\text{ч}$. Эта цифра и сейчас «пугает» разработчиков гироскопических приборов, а в начале века она казалась просто невероятной, поскольку лучшие гироскопы тех времен имели дрейф 5...10°/ч, то есть примерно в 1000 раз больший, чем требовалось.

Непроще обстояли дела и с точностными характеристиками гировертикалей. К моменту возникновения инерциальной навигации были известны лишь гиромаятники. Кстати, именно их применение имелось в виду в предположениях Алексеева и Керри. Однако гиромаятники были неудобны в эксплуатации и обладали низкой точностью (0,5...1°) определения вертикали, как уже отмечалось выше.

Итак, на пути реализации остроумной схемы инерциальной навигационной системы геометрического типа встали серьезные препятствия: существовавшие гироскопы имели точность в тысячи раз хуже той, которая требовалась. По этой причине большинство ученых того времени сочли инерциальную навигацию делом нереальным.

Но инерциальный принцип был и пока остается единственным принципом, на основании которого могут быть созданы полностью автономные навигационные системы. А потребность в таких системах возрастала с каждым годом и особенно остро стоит в настоящее время. Поэтому инерциальная навигация продолжала развиваться. Правда, в начале века «сумасшедшей идее» посвящали свои труды энтузиасты-одиночки. Один из них, Рейнгард Вуссов, предложил определять путь, пройденный объектом, на основе измерения ускорений, с которыми этот объект двигался. Сначала казалось, что Вуссов предложил новый метод навигации, ничего общего с инерциальным не имеющий. Однако более поздние исследования показали, что метод Вуссова также относит-

ся к числу инерциальных, так как в нем фактически геометрические построения частично или полностью заменялись вычислительными операциями. По этой причине инерциальные навигационные системы, построенные с использованием идеи Вуссова, стали называться (в зависимости от конкретной схемы) полуаналитическими и аналитическими.

Поясним идею Вуссова на предельно простом примере. Предположим, что на рельсах стоит вагон, причем рельсы уложены прямолинейно, а платформа вагона всегда занимает горизонтальное положение. Вагон начал равноускоренное движение по рельсам. Спрашивается, каково будет местонахождение вагона (его координата x) по истечении времени t?

Проще всего эта задача решается с помощью школьного учебника физики за 8-й класс. В разделе «Перемещение при равноускоренном движении» читаем: «Координату тела вычисляют по формуле

$$x = x_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2,$$

где x — координата центра масс тела (вагона) по истечении времени t; x_0 — координата начальной точки маршрута; V_0 — начальная скорость вагона относительно рельсов; a — постоянное ускорение, с которым двигался вагон»

Итак, задача может быть решена, если известны начальные условия, то есть числовые значения параметров x_0, V_0.

Пусть в примере с вагоном $x_0 = 0$, $V_0 = 0$, хотя в общем случае навигации задача определения начальных условий так просто не решается. Если $x_0 = 0$, $V_0 = 0$, то новое местонахождение вагона определяется просто: нужно измерить величину ускорения a, умножить ее на квадрат времени движения и взять половину этого произведения. Вот в этом и состояло предложение Вуссова: измерять ускорение и с его помощью вычислять пройденный путь. Идея проста, но, как увидим дальше, простота эта кажущаяся.

Итак, нужно измерить ускорение движения вагона. Это может быть выполнено с помощью приборов, которые называются акселерометрами («акселерация» — ускорение). Существует много схем построения акселерометров. В инерциальной навигации наиболее часто при-

меняются акселерометры на основе маятника, движение которого ограничивается жесткими упругими связями. Схема простейшего акселерометра представлена на рис. 26.

Основными узлами акселерометра являются:

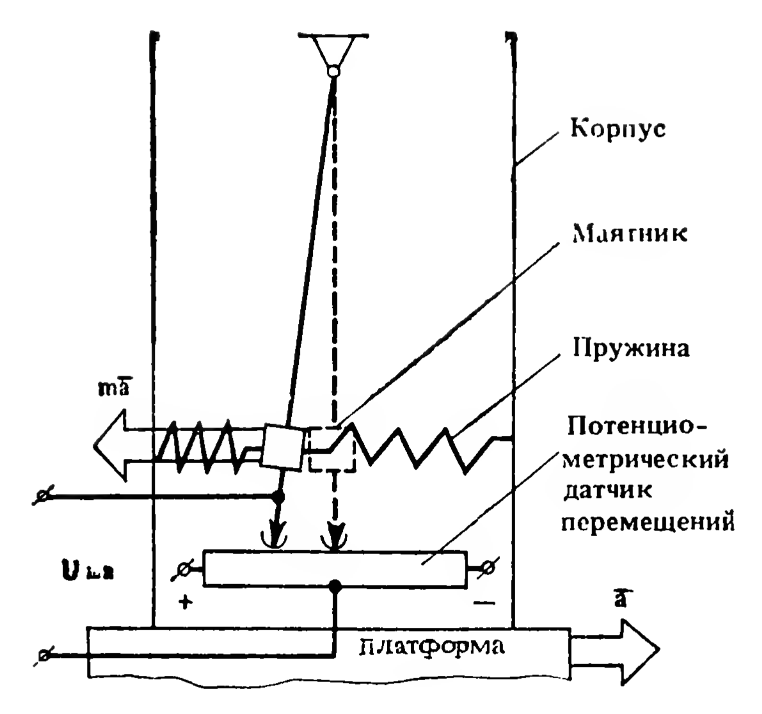


Рис. 26.
Схема акселерометра

корпус, маятник, устройство, создающее упругую силу (обычно это магнитоэлектрическое устройство, но на рисунке для наглядности оно изображено в виде двух механических пружин), измеритель перемещения маятника (обычно это индукционное или фотоэлектрическое устройство, на рисунке изображено в виде простейшего и уже знакомого читателю потенциометрического датчика перемещений).

Акселерометр устанавливается на платформе, ускорение которой нужно измерять. Предположим, что акселерометр установлен на платформе вагона. Вагон начал двигаться с ускорением a, следовательно, с ускорением a начал двигаться и корпус акселерометра. В результате ускоренного движения масса маятника, стремясь сохранить начальное положение, разовьет силу инерции ma (m — масса маятника), которая, сжав левую и растянув правую пружины, немного отклонит маятник относительно корпуса акселерометра. Это отклонение будет преобразовано в электрический сигнал (напряжение U пропорционально a) потенциометрическим датчиком.

Таким образом, ускорение измерено: напряжение, снимаемое с потенциометрического датчика, пропорционально ускорению движения вагона.

Если теперь гарантируется, что движение вагона будет происходить с постоянным ускорением, то, измерив это ускорение с помощью акселерометра и умножив его значение на половину квадрата времени движения, можно получить координату местонахождения вагона.

Но сложность состоит в том, что такую гарантию никто дать не может. Реальные объекты всегда движутся с переменными ускорениями. Как быть? Выход из этого

положения нашел сам Вуссов. Чтобы определить скорость движения, он предложил интегрировать сигнал акселерометра.

Слово «интегрировать» теперь знакомо школьникам старших классов, по смыслу оно близко к словам «суммировать», «накапливать». В инерциальных системах операцию интегрирования выполняет устройство, называемое интегратор.

В простейшем случае роль интегратора может выполнять электродвигатель, у которого скорость вращения вала пропорциональна величине поданного на двигатель напряжения. В этом случае интегрируемой величиной будет поданное напряжение, а результатом интегрирования — «накопленное» за время измерения число оборотов вала, или, говоря точнее, угол поворота вала двигателя.

Если на интегратор подать напряжение, снимаемое с акселерометра, которое пропорционально ускорению, то угол поворота вала электродвигателя будет пропорционален интегралу от ускорения, то есть скорости движения объекта.

Чтобы в дальнейшем было удобно использовать информацию о скорости движения, накопленный угол поворота вала интегратора с помощью несложных устройств преобразуется в пропорциональный ему электрический сигнал — выходное напряжение интегратора. Этот сигнал, естественно, сохраняется (запоминается), если ускорение объекта становится равным нулю и дальше объект движется с постоянной скоростью.

Таким образом, интегрируя выходной сигнал акселерометра, можно получить величину скорости движения вагона. Скорость движения — важнейший навигационный параметр, ее значение должно быть всегда известно на борту движущегося объекта. Инерциальные навигационные системы полуаналитического и аналитического типа обеспечивают выполнение этого важного требования.

Используя информацию о скорости движения, получаемую от интегратора ускорений (первого интегратора), можно определить путь, пройденный вагоном. Для этого нужно применить второй интегратор—интегратор скорости и подать на него электрический выходной сигнал (напряжение) первого интегратора. Таким образом, координата местонахождения вагона в произвольный

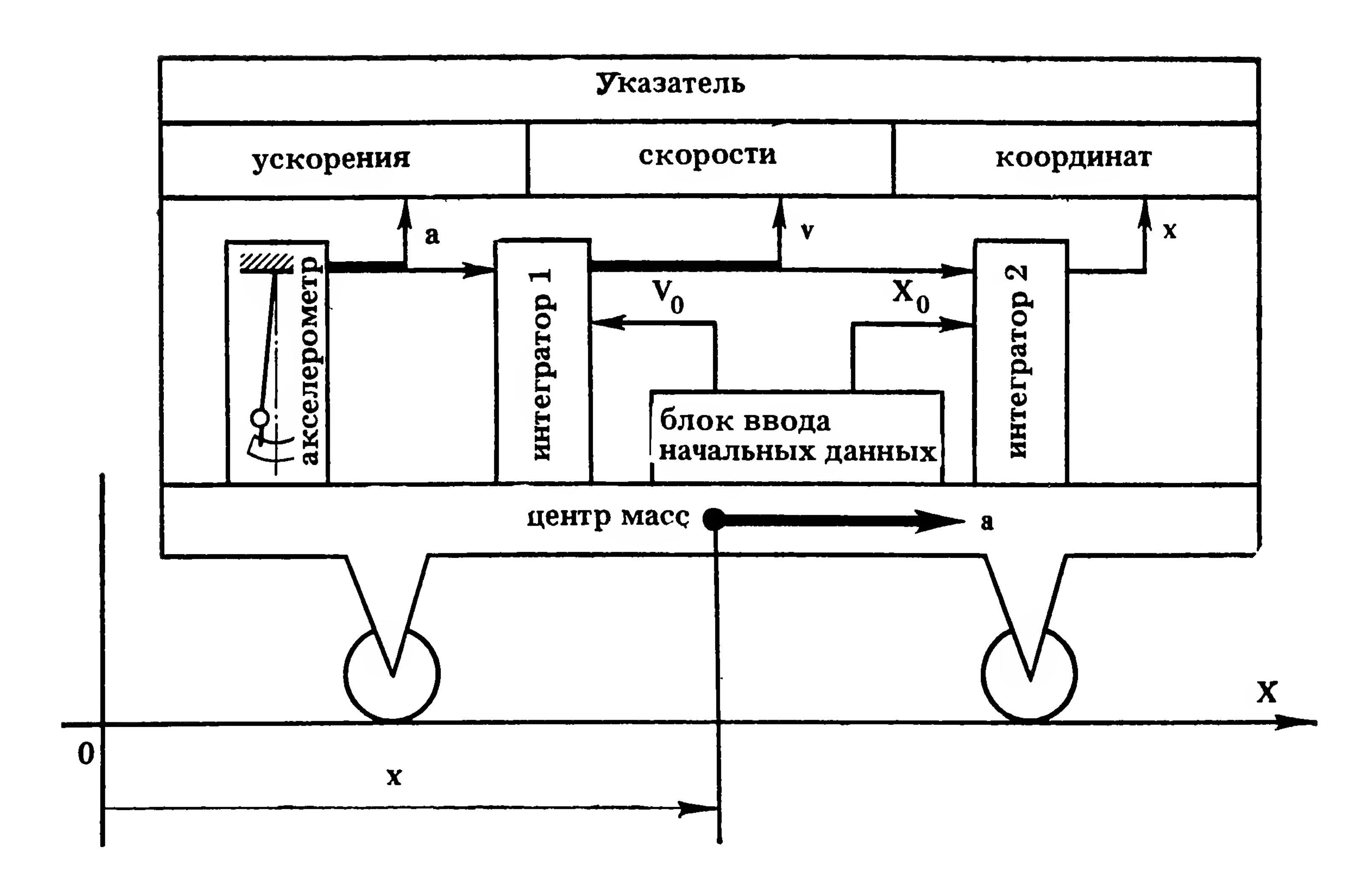
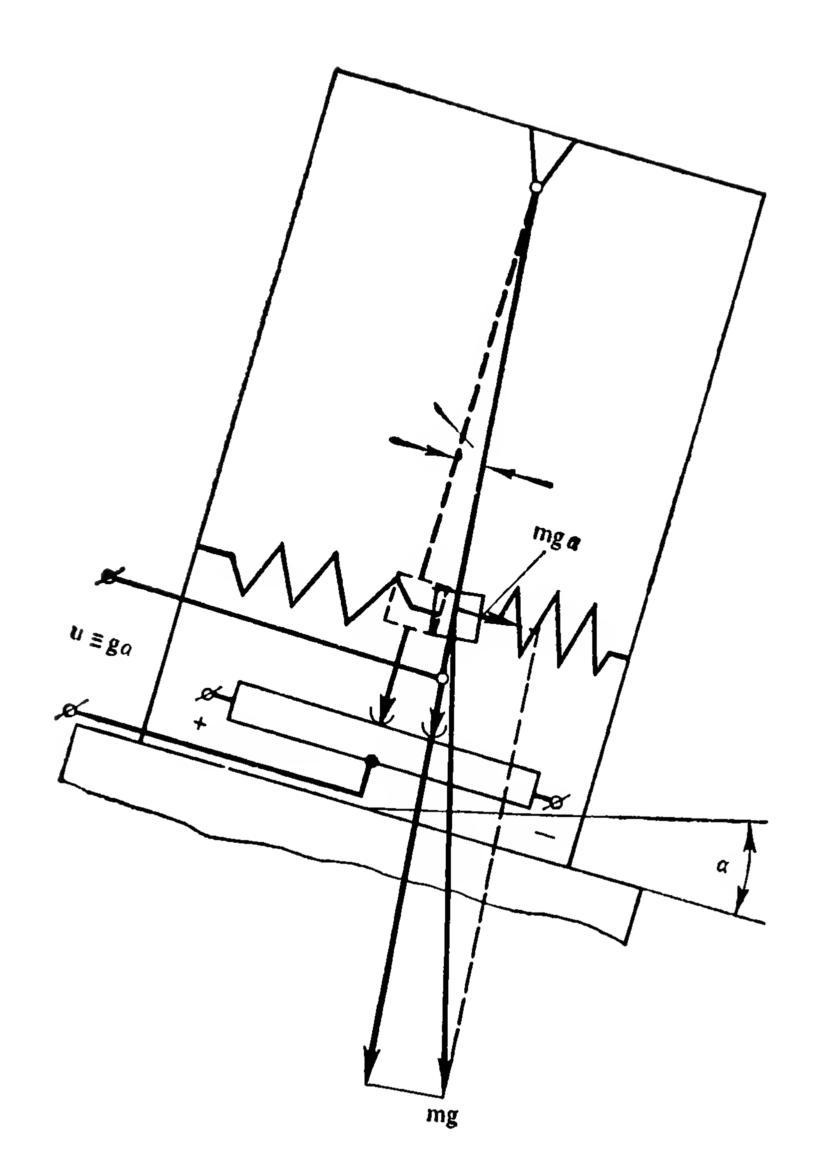


Рис. 27.
Схема, поясняющая принцип действия инерциальной системы, работа которой основана на интегрировании ускорений

момент времени t может быть определена по показаниям второго интегратора.

Итак, чтобы не заблудиться в пути, нужно погрузить на платформу вагона и произвести электрическое подключение следующих основных блоков инерциальной навигационной системы (рис. 27): акселерометра, первого и второго интеграторов, блока ввода начальных данных, указателя навигационных параметров. Это принципиально необходимые блоки для осуществления инерциальной навигации в предельно простом случае: движение вагона происходит в заранее известном прямолинейном направлении (по рельсам), а платформа вагона сохраняет горизонтальное положение. Конечно, для столь простого случая движения никто навигационную систему, да еще инерциальную, строить не будет. В крайнем случае ориентировку можно вести по километровым столбам, стоящим вдоль всех железнодорожных путей. Пример с вагоном дан здесь с целью предельно просто пояснить идею инерциальной навигационной системы, предложенной Вуссовом. Идея красива, она так же, как и идея Керри и Алексеева, позволяет строить полностью автономные навигационные системы.



Но (и вот здесь начинаются огорчения) зачем так много оговорок? Зачем, например, платформа вагона должна быть горизонтальной? Дело в том, что в природе существует несколько разновидностей ускорений, порожденных разными причинами. Например, ускорение, которое придает двигатель нашему вагону, заставляя его двигаться

Рис. 28.
Схема, поясняющая возникновение ложного сигнала акселерометра при его наклоне

относительно поверхности Земли, — относительное ускорение. Ускорение силы тяжести — g. Ускорения, вызываемые вращением Земли, — центростремительное и Кориолисово. Качественных различий между этими ускорениями нет, поэтому акселерометр их не различает и реагирует на них одинаково.

Предположим, вагон стоит неподвижно, но его платформа отклонена от плоскости горизонта на малый угол α (рис. 28). Следовательно, вместе с платформой наклонится корпус акселерометра и потенциометр, но маятник и движок токосъема, стремясь сохранить вертикальное положение под действием составляющей силы веса, сместятся относительно средней точки потенциометра. Появится выходной сигнал акселерометра, который вызовет работу интеграторов и указателей навигационных параметров. Но вагон-то стоит на месте! Значит, сигнал акселерометра ложный, он вносит ошибку в работу инерциальной системы.

Обычно упругая связь маятника с корпусом акселерометра достаточно жесткая. Поэтому угловое смещение (угол ε) движка токосъема относительно средней точки потенциометра мало по сравнению с углом наклона корпуса акселерометра α, но вполне достаточно, чтобы получить четкий выходной сигнал акселерометра

(дальше углом ε по сравнению с углом α будем пренебрегать).

Из простейших геометрических построений, приведенных на рисунке, следует, что при наклоне корпуса акселерометра на маятник действует составляющая силы веса $mg\alpha$, которая смещает маятник на угол ε и порождает ложный выходной сигнал акселерометра, приблизительно пропорциональный $g\alpha$. Оценим, каково должно быть допустимое значение угла α наклона платформы вагона, чтобы по истечении одного часа времени ошибка в определении координаты не превосходила бы 1 мили, то есть примерно 2 км. Для решения поставленной задачи воспользуемся формулой равноускоренного движения при нулевых начальных условиях. Тогда, заменяя в этой формуле ускорение a на ложное ускорение $g\alpha$, получим $x_л = \frac{1}{2} g\alpha t^2$,

$$\alpha = \frac{2x_л}{gt^2} = \frac{2 \cdot 2000м}{9,8м/с^2(3600с)^2} = 3 \cdot 10^{-5} рад \approx 6 угл. с.$$

Отсюда следует: если с помощью автономной инерциальной навигационной системы хотят определить координаты нового местоположения объекта с ошибкой менее 2 км, то акселерометры должны быть установлены на платформе, которая сохраняла бы горизонтальное положение с ошибкой менее 6 угловых секунд. Шесть угловых секунд... Много это или мало, как эту величину представить наглядно? Наклон в шесть угловых секунд будет иметь рельс длиной 1 км, если один его конец приподнять всего на 3 см (предполагается, что рельс при этом не прогибается). Такой наклон могут заметить лишь точнейшие современные приборы — акселерометры и гравиметры.

Кстати, а какова же величина ложного ускорения $g\alpha$?

$$a_л = g\alpha = 3 \cdot 10^{-5} g \approx 0,0003\ м/с^2.$$

Да, цифры снова получаются фантастическими. Но и это еще не все. В приведенном примере вагон двигался прямолинейно по рельсам, то есть бокового движения не имел. Реальные объекты (корабли, самолеты и др.) могут иметь и боковое движение — снос, движение вместе со средой из-за течений и ветра. Чтобы учесть изменение местонахождения объекта за счет бокового движения, инерциальная навигационная система дополняется еще

одним каналом, включающим в себя акселерометр, два интегратора, блок ввода начальных данных, указатели. Причем второй акселерометр устанавливается на объекте так, что направление измеряемых им ускорений перпендикулярно направлению ускорений, измеряемых первым акселерометром.

Дорогу осилит идущий

Долгое время идея Вуссова считалась нереальной. Ученые и инженеры не знали, как сделать акселерометр, который измерял бы с высокой точностью и очень малые ускорения (около $10^{-5}g$) и достаточно большие ($2...10g$). Не знали они, и как сделать платформу, которая во время движения объекта сохраняла бы горизонтальное положение с точностью единиц и первых десятков угловых секунд. И еще очень многих тайн инерциальной навигации не знали инженеры и ученые. Идея казалась безнадежной. Засомневался даже М. Шулер, который в начале века бесстрашно взялся и успешно решил «безнадежную» проблему создания корабельного гирокомпаса. Теперь он, авторитетный ученый в области гироскопических приборов, вольно или невольно оказался в стане противников инерциальных систем, заявив, что в навигации без астрономических наблюдений не обойтись. Это тем более странно, что к тому времени (1923 г.) он уже открыл условие (период Шулера — 84,4 мин), при выполнении которого гиромаятник сохранял вертикальное положение при любом, даже ускоренном движении объекта. Реализация этого условия в послевоенные годы позволила создать первые инерциальные системы для кораблей и самолетов. Отрицательное мнение Шулера, конечно, замедлило развитие инерциальных систем. И может быть, прав американский специалист по инерциальной навигации Джон М. Слейтер, обронивший сердитую фразу: «Это неверие в потенциальные возможности гироскопических устройств не дает ему (М. Шулеру) права считаться создателем инерциальной навигации».

Не хотели рисковать — «ловить журавля в небе» и практичные американские фирмы. Тот же Слейтер пишет: «У нас, в США, проблемы инерциальной навигации научно не разрабатывались... Даже в начале 1946 года

еще не было ясного понимания принципов инерциальной навигации».

Маститые ученые говорили «нет», а энтузиасты и дилетанты продолжали работать. Один из них — Иоганн Мария Бойков. Офицер австрийской армии, он оставляет службу и становится актером, затем переходит на работу в одну из фирм, изготовляющих навигационные приборы. В годы первой мировой войны Бойков служит летчиком и здесь впервые сталкивается с проблемами навигации самолетов. После окончания войны Бойков основывает фирму «Месгерете Бойков» и начинает работать над созданием автопилота и автоматических навигационных систем (автоштурманов). Бойков оказался талантливым изобретателем, его фирма быстро стала обладателем большого числа патентов в области гироскопического приборостроения. Был среди них и обширный патент «Измеритель пути», полученный в 1933 г. Сущность предложения сводилась к тому, что на горизонтальную платформу, стабилизируемую гироскопами, устанавливались два оригинальных прибора — двукратно интегрирующих акселерометра. Реагируя на ускорения, эти приборы сразу давали показания в единицах пройденного пути, то есть производили двукратное интегрирование ускорения. И хотя эти акселерометры никогда практически не применялись, в специальной литературе они упоминаются как образец комплексного и остроумного подхода к решению проблемы.

Изобретением Бойкова сразу же заинтересовались фашистские разработчики баллистических ракет. По словам Слейтера, события дальше развивались так. «Проблема управления ракетами дальнего действия не могла быть решена приспособлением для них обычной навигационной техники. Если флот и авиация могли и дальше существовать без автономных систем управления, то для ракет последние были необходимы, так как полагаться на радиосистемы было нельзя ввиду их чрезвычайной уязвимости.

Среди специалистов по ракетам имелось мнение, что на основе гироскопов и акселерометров можно создать такие системы. Не имея достаточных знаний и опыта, они обратились за помощью к Бойкову, который согласился вести разработку системы управления. Вскоре стало очевидно, что он может только изобретать, но питает полное отвращение к практической работе».

После разгрома Германии в 1945 г. фашистские ракетчики попали в Соединенные Штаты, имея уже опытные образцы инерциальных систем для баллистических ракет.

С 1946 г. инерциальная навигация начинает энергично развиваться в США.

Несколько раньше Бойкова, в 1932 г., советские инженеры Л. М. Кофман и Е. Б. Левенталь предложили новую схему инерциальной системы навигации. В этой системе на горизонтальной гиростабилизированной платформе устанавливались два акселерометра, оси чувствительности которых были взаимно перпендикулярны и параллельны осям гироплатформы. Оси платформы с помощью курсового гироскопа постоянно удерживались на первоначально заданном азимутальном направлении.

В наиболее наглядном случае (но не простейшем) оси гироплатформы могли удерживаться на географических направлениях. Например, одна ось направлялась, вдоль меридиана на север, другая — вдоль параллели на восток. Следовательно, один акселерометр измерял ускорение, с которым двигался объект в направлении север — юг, а другой — ускорение, с которым двигался объект в направлении запад — восток. Интегрированием ускорений вычислялись расстояния, пройденные объектом в направлениях север — юг и запад — восток, на основании пройденных расстояний вычислялись географические координаты объекта (широта φ и долгота λ).

Во всем этом особой новизны не было, подобный принцип предлагал еще Вуссов. Заслуга Кофмана и Левенталя в другом. Ими была решена одна из основных проблем инерциальной навигации — проблема создания гиростабилизированной платформы, удерживающей с высокой точностью акселерометры в горизонтальной плоскости. Кофману и Левенталю был известен упоминавшийся ранее принцип радиальной коррекции гирогоризонта. Сущность его состояла в том, что сигнал, снимаемый с маятника или акселерометра, подавался на датчик момента гироскопа; датчик момента развивал момент, вынуждая гироскоп прецессировать вслед за земной вертикалью, менявшей свое положение в абсолютном пространстве вследствие вращения Земли и движения объекта. Таким образом, гироскоп как бы отслеживал положение маятника. Гирогоризонты с радиальной

коррекцией были более совершенны по сравнению с гиромаятниками, но высокой точности выдерживания горизонтальной плоскости, необходимой для инерциальных систем, они не обеспечивали, так как обладали методическими ошибками: скоростной и баллистической.

Скоростная ошибка, как следует из ее названия, обусловливалась скоростью движения гирогоризонта относительно абсолютного пространства. Сущность ее заключалась в следующем. Чтобы заставить «внеземное существо» — гироскоп — прецесссировать (следить за земной вертикалью, непрерывно меняющей свое положение относительно абсолютного пространства), нужно непрерывно подавать сигнал с маятника на датчик момента гироскопа. Но чтобы с маятника шел непрерывный сигнал, сам маятник постоянно должен быть хоть немного отклонен от направления земной вертикали. Гироскоп, отслеживая положение отклоненного маятника, сам оказывался отклоненным от направления земной вертикали Это отклонение и являлось скоростной ошибкой гирогоризонта. Величина ошибки зависела от скорости движения и параметров системы коррекции и составляла обычно около 10 угловых минут.

Баллистическая ошибка возникала, когда объект, на котором устанавливался гирогоризонт, начинал двигаться с ускорением. В этом случае сила инерции, порожденная ускорением, отклоняла массу и плечо маятника от направления земной вертикали. В результате на датчик момента гироскопа начинал поступать ложный сигнал, пропорциональный этому отклонению. Под действием ложного сигнала гироскоп прецессировал, уводя гирогоризонт из действительно горизонтального положения. Величина этой ошибки зависела от параметров системы, коррекции величины и длительности ускорения и иногда достигала единиц градусов.

Как видим, ошибки гирогоризонтов с радиальной коррекцией были велики, строить на их основе инерциальные системы было нельзя. Как же решили проблему Кофман и Левенталь? Их решение было неожиданным и эффективным. Они предложили подавать сигнал с акселерометра на датчик момента гироскопа не сразу, как это было в схеме радиальной коррекции гирогоризонта, а лишь после того, как этот сигнал пройдет первые интеграторы. Такая система коррекции гироскопа стала называться интегральной.

Первый интегратор накапливал и удерживал («запоминал») сигнал, поступающий с акселерометра, а затем подавал его на моментный датчик гироскопа. Гироскоп прецессировал, приходил сам и приводил платформу с акселерометрами в плоскость горизонта. Сигнал с акселерометра прекращался, но «запомненный» сигнал с выхода первого интегратора продолжал поступать на датчик момента гироскопа. В результате этого платформа гирогоризонта продолжала прецессировать в абсолютном пространстве, оставаясь с высокой точностью в плоскости истинного горизонта. Таким образом была устранена скоростная ошибка гирогоризонта. Кроме этого, детальные исследования гирогоризонта с интегральной коррекцией, проведенные в 1938 г. членом-корреспондентом АН СССР Б. В. Булгаковым, показали, что он относится к классу устройств, для которых возможна настройка на период Шулера. А это значило, что специальным подбором параметров системы интегральной коррекции можно было устранить и баллистические ошибки гирогоризонта.

Казалось, был найден принципиальный путь создания гирогоризонта, точность которого зависела только от несовершенства изготовления его основных деталей и узлов, то есть от его инструментальных ошибок. Это вселяло надежду, удваивало усилия, прилагавшиеся к работе по совершенствованию самих гироскопических приборов.

«Огорчил» всех профессор С. С. Тихменев. Дело в том, что Булгаков провел анализ работы гирогоризонта с интегральной коррекцией без учета вращения Земли. Тихменев в своей книге «Авиационные приборы» (1940) обратил внимание на тот факт, что вращение Земли порождает переносные ускорения — центростремительные и Кориолисовы, на которые должны реагировать очень чувствительные акселерометры инерциальных систем. Таким образом, получалось, что акселерометр измерял то ускорение, с которым объект двигался относительно абсолютного пространства, то есть абсолютное ускорение.

Полезную информацию о перемещении объекта относительно поверхности Земли давало не абсолютное ускорение, а лишь его часть — ускорение, с которым объект двигался относительно поверхности Земли, то есть ускорение относительное. Появилась новая задача:

как выделить из абсолютного ускорения относительное и из абсолютной скорости относительную? В 40-х гг. ясности по этому вопросу не было. В 50-е на помощь пришла бурно развивавшаяся вычислительная техника.

На основании констант (скорости вращения Земли U, ее радиуса R) и скорости движения объекта, определенной самой инерциальной системой, вычислялись величины переносных ускорений и скоростей. Эти величины вычитались затем из абсолютных ускорений и скоростей, измеренных акселерометрами и интеграторами. Все вычислительные операции проводили начинавшие победное шествие электронно-вычислительные машины. «Очищенная» от переносных составляющих, информация шла дальше, и на ее основании определялись координаты местонахождения объекта и другие навигационные параметры.

Задача выделения полезной информации была успешно решена, но на смену ей появились новые. как определить (опять же с высокой точностью) начальные координаты местонахождения объекта, как осуществить начальную ориентацию гироплатформы и установленных на ней акселерометров с высокой точностью в азимуте; как учесть несферичность Земли, как... Стоп! Читателю уже ясно, что круг вопросов, связанных с созданием инерциальных систем, очень широк. Добавим только, что этот круг не становится у́же по мере развития и совершенствования инерциальных систем. Наоборот, он расширяется... Например, успехи в создании быстродействующих вычислительных машин «оживили» еще один класс инерциальных систем. Специалисты вновь обратились к идее, высказанной и частично реализованной в Советском Союзе еще в начале 30-х гг. Одной из проблем того времени, остро вставших в авиации, был штопор самолетов. Для изучения общих закономерностей штопора и, в частности, штопора самолета Р-5, группа советских инженеров во главе с В. С. Ведровым разработала теорию навигационной инерциальной системы, чувствительные элементы которой — акселерометры и гироскопические датчики угловых скоростей — устанавливались непосредственно на корпусе самолета. При такой аппаратурной реализации отпадала необходимость в сложной и дорогой гироскопической платформе, заключенной в карданов подвес. Поэтому позже подобные си-

стемы стали называться **бескарданные инерциальные навигационные системы** (БИНС).

В той первой БИНС информация, получаемая с чувствительных элементов, записывалась в полете, а затем математически обрабатывалась на Земле с помощью механических арифмометров.

Основные блоки чувствительных элементов — самописец угловых скоростей (жирограф) и самописец ускорений (акселерограф) — были разработаны молодым выпускником МВТУ им. Н. Э. Баумана, будущим академиком, «штурманом ракет» Н. А. Пилюгиным.

В результате обработки синхронизированных по времени записей жирографа и акселерографа вычислялись по достаточно сложным алгоритмам параметры движения центра масс самолета и параметры его движения вокруг центра масс.

С созданием малогабаритных и быстродействующих вычислительных машин сложные вычислительные операции стали проводиться в реальном масштабе времени непосредственно на борту движущегося объекта. Однако на пути широкого внедрения БИНС еще стоят серьезные проблемы. Дело в том, что требования по точности, предъявляемые к чувствительным элементам БИНС, нисколько не ниже, чем требования, предъявляемые к чувствительным элементам карданных инерциальных систем. Но чувствительные элементы, установленные непосредственно на корпусе движущегося объекта, испытывают более сильные механические воздействия (тряску, удары, вибрации), чем чувствительные элементы, установленные на гироплатформе, обычно имеющей систему виброзащиты. Поэтому обеспечить необходимую точность работы чувствительных элементов БИНС намного сложнее, чем чувствительных элементов карданных систем.

К середине 50-х гг. многие теоретические проблемы инерциальной навигации были изучены и правильно поняты. Большая заслуга в этом принадлежит академику А. Ю. Ишлинскому. В его работах впервые четко доказана возможность строгого решения задачи автономного определения местоположения движущегося объекта с помощью трехосного гиростабилизатора, акселерометров и вычислительных устройств, а также с помощью системы, чувствительным элементом которой является значительно усовершенствованный морской гирокомпас, получивший название гирогоризонткомпаса.

Кроме этого, А. Ю. Ишлинским разработаны математические основы инерциального управления полетом вертикально стартующих ракет и рассмотрены многочисленные вопросы, связанные с созданием прецизионных гироскопических приборов, необходимых для построения инерциальных систем.

Труды А. Ю. Ишлинского служат основой для дальнейших исследований в области инерциальной навигации.

Уяснение теоретических вопросов позволило перейти к построению инерциальных систем и их испытаниям на движущихся объектах. В США, например, первые летные испытания инерциальной системы состоялись в октябре 1953 г. Комплект навигационной аппаратуры, поднятой в воздух на самолете, имел массу 1200 кг.

Но испытания удовлетворительных результатов не приносили. Ошибки в определении координат после 1 ч. полета или плавания составляли несколько десятков километров. Ошибки были пока недопустимо велики. Объяснялось это не очень высокой точностью работы основных элементов инерциальных систем гироскопов и акселерометров. Так, гироскопы тех времен имели дрейф 0,2...0,5°/ч, а акселерометры имели порог чувствительности около $10^{-4}\,g$. Кроме того, в самом принципе действия инерциальных систем была заложена неприятная особенность; ошибки возрастали (накапливались) с течением времени движения объекта. Интегрируя «полезные ускорения», дававшие информацию о действительном перемещении объекта относительно поверхности Земли, интеграторы инерциальных систем одновременно интегрировали и ложные ускорения, дававшие ошибки в определении координат и скорости. Причем неточность работы акселерометров давала ошибку в определении координат, пропорциональную квадрату времени движения объекта t^2, а дрейф курсового гироскопа обусловливал ошибку в определении координат, пропорциональную кубу времени движения объекта t^3.

Таким образом, к концу 50-х гг. стало ясно: чтобы получить приемлемые точности работы инерциальных систем, нужно создать акселерометры с порогом чувствительности $(10^{-5} \ldots 10^{-6})g$ и гироскопы с дрейфом (0,01... 0,001)°/ч.

Эти задачи до конца не решены и в настоящее время. Так что в основном пока прав М. Шулер, считавший,

что без дополнительных неавтономных средств инерциальная навигация невозможна.

Трудности, вызванные созданием высокоточных гироскопов и акселерометров, привели к возникновению так называемых корректируемых инерциальных систем. Сущность работы этих систем, получивших в настоящее время широкое распространение, состоит в том, что показания автономной инерциальной системы, работающей в непрерывном режиме, периодически уточняются (корректируются) на основании данных, полученных от какой-либо неавтономной навигационной системы радиосистемы, астросистемы или системы, реализующей обзорно-сравнительный метод.

Уточнение показаний инерциальной системы происходит в тот момент, когда условия работы неавтономной системы наиболее благоприятны и она обеспечивает наиболее высокую точность.

Корректируемые инерциальные системы позволяют получить в настоящее время достаточно высокие точности. Так, американская реклама утверждает, что инерциальная система, которую предполагается установить на низколетящей крылатой ракете «Тамагавк» и корректировать от неавтономной системы «Терком», реализующей обзорно-сравнительный метод навигации, выводит ракету в заданный район площадью с футбольное поле. Если на последнем этапе полета инерциальная система корректируется от другой неавтономной системы «Смэк», также реализующей обзорно-сравнительный метод, то ракета выходит в район размером с вратарскую площадку.

Корректируемые инерциальные системы навигации позволили проложить ряд маршрутов, ранее считавшихся невозможными.

Например, подводный путь на Северный полюс Земли. О нем мечтал еще Г. Аншютц, работая над гирокомпасом. Но этот путь стал возможен лишь после создания могучих подводных лодок и совершенной навигационной аппаратуры, способной непрерывно определять местонахождение судна и указывать дальнейший безошибочный путь к полюсу под вековыми льдами, в кромешной тьме холодных вод Ледовитого океана.

17 июля 1962 г. советская атомная подводная лодка «Ленинский комсомол» достигла Северного полюса Земли. Рассказывает ее командир Герой Советского Со-

юза Л. М. Жильцов: «И вот на часах 6.40 (время, конечно, московское). Штурман докладывает: «До полюса — 10 минут хода». Кто-то советует немного изменить курс, чтобы не погнуть могучим корпусом атомохода ось планеты.

6 часов 50 минут. Объявляю по громкоговорящей связи: «Товарищи! Наша лодка на Северном полюсе!» Все свободные от вахты собираются у празднично накрытых столов.

Полюс! От имени руководителя похода и командования корабля поздравляю экипаж. В ответ по отсекам раздается раскатистое «ура!»

Да, это настоящий праздник. Успехом мы обязаны были прежде всего нашим замечательным ученым, инженерам, техникам, рабочим, создавшим такие прекрасные корабли, как наш «Ленинский комсомол», корабли, которым под силу выполнение столь сложной задачи. Обязаны Коммунистической партии, Советскому правительству, делающим все, чтобы обороноспособность социалистической Родины находилась на том уровне, которого требует сложная современная международная обстановка».

После похода корреспондент «Правды» обратился к Л. М. Жильцову с вопросом: «Лев Михайлович, а что было самым трудным во время похода к полюсу?»

— Конечно, всплытия. Подо льдом мы плавали уже неоднократно. Но всплывать в таких сплоченных льдах пришлось фактически впервые». Как видим, всплытия пока необходимы. Они преследуют многие цели, в том числе и навигационные...

Проблема создания полностью автономной, длительно действующей навигационной системы еще ждет своего окончательного решения.



НЕ МЕХАНИКОЙ ЕДИНОЙ...

ГЛАВА 8

Где некогда все было пусто, голо,
Теперь младая роща разрослась.

А. С. Пушкин

Расширение областей применения гироскопов и круга задач, решаемых ими, стимулирует поиск новых принципов построения гироскопов. Результаты поиска — гироскопы вибрационные, шаровые, магнитогидродинамические, лазерные, ядерные

Применение расширяется, требования растут

В начале 60-х гг. в Польше была издана научно-популярная книга, называлась она «Сто профессий гироскопа». Автор не преувеличивал. Уже тогда гироскопы имели широкое применение, а сейчас обязанностей у них стало еще больше. Современную гироскопическую технику можно сравнить с могучим ветвистым деревом. Как и другие деревья, она имеет ствол, скелетные ветви и многочисленные мелкие веточки. Скелетные ветви — это те основные группы гироскопических систем, о которых было кратко рассказано в предыдущих главах книги, — курсовые гиросистемы, системы гироскопической стабилизации, системы управления угловым движением объекта вокруг его центра масс (автопилоты), системы управления поступательным движением центра масс объекта (автоштурманы). От этих скелетных ветвей тянутся многочисленные веточки конкретных применений базовых гироскопических

приборов двухстепенных и трехстепенных гироблоков. В предыдущих главах рассматривалась в основном одна характеристика гироприбора — его точность. Характеристика эта важнейшая, но не единственная. С расширением областей применения гироскоп стал все чаще попадать в экстремальные условия эксплуатации. В одних он должен нормально работать при действии высоких линейных перегрузок (до сотен единиц), в условиях интенсивной вибрации, высоких и низких температур. В других должен, работая длительное время (до десятков тысяч часов), оставаться «молодым» — не изнашиваться, сохранять точность. В третьих должен иметь моментальную готовность к работе.

В этих и подобных случаях гироскоп, кроме заданного уровня точности, должен обеспечивать и другие характеристики: механическую прочность, долговечность, быстрый запуск...

Расширение областей применения повлекло за собой увеличение объема производства гироскопических приборов. А это значит, что в разряд важных выдвинулись такие характеристики гироприборов, как стоимость, трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость, технологичность, простота конструкции и обслуживания. К четырем первым из этих характеристик очень подошло бы прилагательное «низкая».

Кроме того, техника не стоит на месте. Одно из ее генеральных направлений развития — переход от макроуровня к микроуровню. В истории любого механизма можно увидеть ступеньки этого перехода. Особенно процесс миниатюризации усилился в последние годы. Вспомним хотя бы микро-ЭВМ (калькуляторы), с помощью которых даже школьники теперь выполняют домашние задания, окончательно забывая немашинные правила простейших вычислений.

Не остается в стороне и гироскопическая техника. Помните: «Комплект навигационной аппаратуры, поднятый в воздух на самолете, имел массу 1200 кг». Современная зарубежная реклама утверждает, что созданы самолетные инерциальные системы, масса которых не превышает 20 кг, а два трехстепенных гироблока свободно размещаются на женской ладони. Так что миниатюризация — одно из важных требований и направлений развития современной гироскопической техники.

В идеальном случае хотелось бы иметь такой гиро-

скопический прибор, который одновременно удовлетворял бы всем перечисленным требованиям и, следовательно, мог бы работать в любых условиях эксплуатации. Однако создать такой универсальный прибор невозможно, ибо требования, предъявляемые к нему, противоречивы. Поэтому разработчики для решения своих проблем пошли по иному пути.

Среди многочисленных требований, предъявляемых к гироприбору, выделяются важнейшие для данных условий эксплуатации. Эти требования удовлетворяются в первую очередь, даже в ущерб многим другим. В результате гироприборы решают поставленные перед ними задачи, разработчики чувствуют себя победителями — «властвуют» над проблемой. Такой подход породил большое количество гироскопических приборов, одни из которых обладают высокой точностью, но и высокой стоимостью, другие — средней точностью, но малыми габаритами, третьи — низкой точностью, но и низкой стоимостью.

Создавая многочисленные разновидности гироскопических приборов, ученые и инженеры все чаще стали попадать в ситуации, когда поставленная задача вообще не решалась с помощью традиционной маховично-роторной гироскопической техники. Теперь такую технику называют классической.

Часто классическая гиротехника не обеспечивала в полной мере решения задач точности, низкой стоимости, миниатюрности. Поэтому разработчики стали более активно интересоваться успехами других наук, или, как теперь принято говорить, стали искать решения своих проблем на стыках наук. И поиски увенчались успехом. В настоящее время уже известно более 100 различных физических явлений и принципов, на основе которых могут быть построены гироскопические приборы. А все началось... с комара.

Вибрационные гироскопы

В 1938 г. в зарубежной периодической печати появляются первые сообщения об исследованиях двукрылых насекомых с целью изучения способов их ориентации в полете и аппарата управления

полетом. Было обнаружено, что некоторые насекомые обладают парой стержнеобразных придатков, называемых жужжальцами, которые, вибрируя с размахом до 75°, совершают около 500 колебаний в секунду. Эксперименты, выполненные с применением скоростной киносъемки и записи соответствующих биотоков, показали, что при повороте туловища насекомого по курсу или тангажу возникают колебания жужжалец в другой плоскости. Эти колебания воспринимаются особыми чувствительными клетками (сенсилами), расположенными в основании жужжалец. Сенсилы дают команду на выравнивание корпуса насекомого. Автопилот, не правда ли? В его составе есть и гироскопический прибор, только в нем вращательное движение заменено на более экономичное колебательное. Ученые воспроизвели работу жужжалиц с помощью камертона (рис. 29) и получили удивительный результат. Оказалось, если установить камертон вертикально на какую-либо платформу, которая может вращаться вокруг вертикальной оси, возбудить с помощью электромагнитов колебание усиков камертона (жужжалец), а затем начать поворачивать платформу, то ножка камертона начинает периодически закручиваться вокруг своей вертикальной оси. Причем частота закручивания равна частоте колебаний усиков камертона, а наибольший угол закрутки пропорционален величине угловой скорости вращения платформы. Измеряя наибольший угол закрутки ножки камертона с помощью датчика угла, можно судить о величине угловой скорости вращения платформы. То есть камертон проявляет свойства гироскопа с двумя степенями свободы. Но ведь камертон значительно проще по устройству, чем классический гироскоп с двумя степенями свободы, на его работу не влияет бич классических гироскопов — сухое трение опор, так как опор у камертон-гироскопа нет. В гироскопической технике начался бум.

Максималисты заявляли, что пришел конец классической гироскопии, она будет вытеснена камертон-гироскопами. Но чем глубже изучались камертон-гироскопы, тем больше «темнела слава их знамен». Выяснилось, что камертон-гироскопы плохо работают в условиях вибрации, у них трудно с высокой точностью измерять углы закрутки ножки, поддерживать стабильность показаний... Камертон-гироскопы в чистом виде не пошли, но идея вибрационного гироскопа оказалась очень плодотворной,

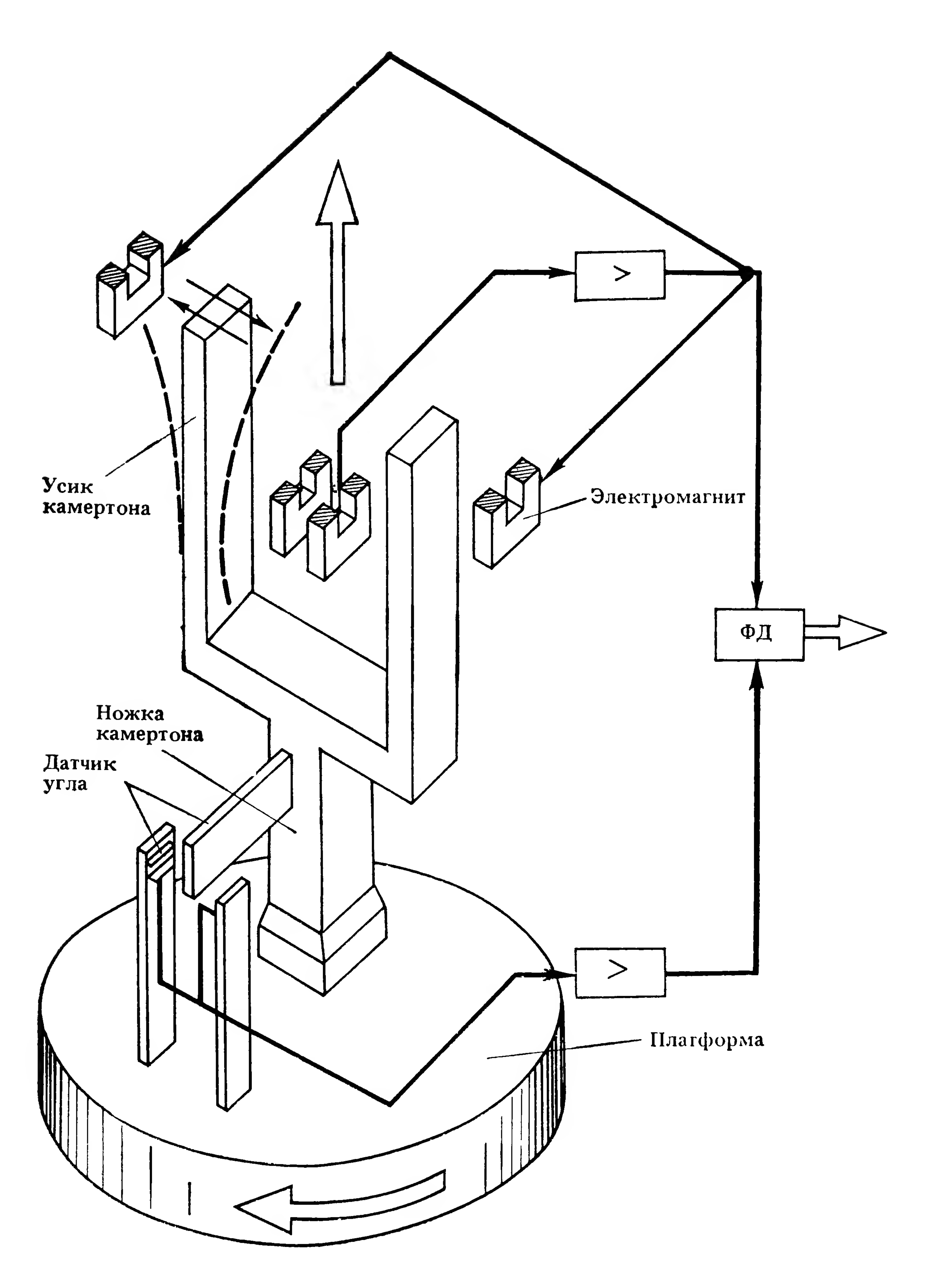


Рис. 29.
Схема камертон-гироскопа

Начали предлагаться и разрабатываться гироскопы, использующие пьезоэффект, эффект колебания струны, вибрационно-жидкостные гироскопы и, наконец, гироскопы, у которых вибрирует вращающийся ротор. К последним может быть отнесен и динамически настраиваемый гироскоп. Однако рано или поздно на пути повышения точности каждого вибрационного гироскопа вставали серьезные технические трудности, сдерживавшие их практическое применение. Стремление обойти эти трудности вывело разработчиков гироприборов на новый физический принцип — инертное свойство упругих волн, возбужденных в твердых телах. Гироскопы, использующие этот принцип, получили название **волновых твердотельных гироскопов** (ВТГ). Расскажем о них более подробно.

Представим себе небольшую полусферическую чашу с тонкими стенками и вертикальной ножкой, выполненную из кварца. Полусферическую чашу в дальнейшем будем называть резонатором. Чаша установлена на горизонтальной платформе, которая может вращаться относительно инерциального пространства вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью ножки чаши. Предположим, что удалось возбудить и в дальнейшем поддерживать колебания стенок полусферического резонатора. При этом стенки резонатора поочередно пульсируют в двух взаимно перпендикулярных направлениях, лежащих в горизонтальной плоскости, в результате чего круглый (до возбуждения колебаний) верхний срез резонатора периодически превращается в овальный. Половину разности между большой осью овала и диаметром верхнего среза полусферического резонатора можно рассматривать как амплитуду упругой волны, возбужденной в твердом теле.

Совместим ось упругой волны (большую ось овала) с соответствующей горизонтальной осью платформы, а затем приведем платформу во вращение вокруг вертикальной оси. Упругая волна четко проявит свое инертное свойство: вращаясь вместе с платформой, ось волны будет отставать от соответствующей оси платформы. Доказано, что угол, заключенный между осью волны и соответствующей осью платформы, несет полную информацию об угле поворота платформы относительно инерциального пространства.

Детальные теоретические исследования показывают, что ВТГ обладает многими положительными качествами. Он может быть изготовлен из материалов с очень

стабильными характеристиками (например, из кварца), что является необходимым условием получения высокой точности, на точность его работы не влияют силы трения, например внутреннее трение в материале резонатора и трение о газовую среду (которые являются одним из основных факторов, сдерживающих повышение точности динамически настраиваемого гироскопа); явления захвата волны вращающимся основанием, характерное для лазерного гироскопа, в ВТГ не обнаружено. К этому нужно добавить, что ВТГ обладает малыми габаритами, потребляемой мощностью, временем выхода на рабочий режим, допускает перерывы в электропитании. Относительная простота конструкции позволяет рассчитывать на низкую стоимость ВТГ.

Основные причины дрейфа ВТГ связаны с погрешностями изготовления резонатора: некруглость резонатора, различная толщина его стенок, неоднородность материала и т. д.

В целом ВТГ рассматривается в настоящее время как один из самых перспективных гироскопов.

Опоры без трения

Старинные легенды утверждают, что железный гроб с телом пророка Магомета висел без видимых опор в одной из пещер, не касаясь ни пола, ни потолка, ни стен... Возможно ли это? «Возможно!» — считали фанатичные мусульмане, объясняя этот феномен вмешательством сверхъестественных сил. «Возможно!» — считали средневековые ученые, которые уже знали, что на железные предметы действует сила притяжения полюсов магнита. Они думали, что вес гроба уравновешивался силой притяжения магнита. «Невозможно!» — заявил в 1839 г. английский ученый Ирншоу, математически доказавший, что система тел, которые отталкиваются или притягиваются с силами, обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними, не может быть устойчивой (висеть). А именно таким был характер сил притяжения полюсов постоянных магнитов. «Возможно!» — пришел к заключению А. Эйнштейн и доказал это практически, осуществив индукционный магнитный подвес гиросферы, знаменитого гирокомпаса фирмы «Аншютц». Опровергнута теорема Ирншоу? Нет!

Просто открыт новый тип магнитного подвеса, осуществленный с помощью переменного электрического тока, а не с помощью постоянных магнитов.

«Возможно!» — заявил американский ученый Д. Бимс и предъявил сверхскоростную центрифугу, ротор которой не имел механического контакта с корпусом и удерживался в этом положении с помощью электромагнитных сил, регулируемых специальной автоматической системой.

«Возможно!» — подвел итог спору в 1945 г. советский ученый профессор МГУ В. К. Аркадьев. В проведенном им опыте небольшой постоянный магнит свободно парил над вогнутой свинцовой чашей. Секрет опыта состоял в том, что чаша была сильно охлаждена и представляла собой сверхпроводник, который, как установил в 1933 г. Мейснер, был непроницаем для магнитного поля постоянного магнита. Опираясь на силовые линии своего магнитного поля как на пружины, постоянный магнит висел над чашей...

Но если возможность бесконтактного подвеса твердых тел доказана, то почему бы ее не применить в гироскопической технике? Перед разработчиками гироприборов начали открываться заманчивые перспективы. Гироприбор с бесконтактным подвесом они представляли себе следующим образом. Маленький шар (диаметром 10... 20 мм) помещается в сферическую полость герметичного корпуса. Специальные устройства, расположенные на корпусе, создают магнитные или электростатические силы, которые центрируют шар внутри сферической полости корпуса. В результате шар висит, не касаясь внутренней поверхности корпуса. Поскольку магнитные и электрические поля могут существовать в безвоздушной среде, из внутренней герметичной полости корпуса можно откачать воздух, создать там глубокий вакуум. Если раскрутить шар, то описанный прибор превращается в миниатюрный гироскоп с тремя степенями свободы. Гироскопические приборы, построенные по описанной схеме, называются **шаровыми гироскопами.** Тип примененного бесконтактного подвеса дает и более точное название шаровому гироскопу. Например, если для подвеса шара используются силы электрического поля, то гироскоп называется **электростатическим**; если эффект Мейснера (который пока появляется в сильно охлажденных телах), то гироскоп называется **криогенным**;

если используются электромагниты с регулируемыми силами притяжения, то гироскоп называется **гироскопом с магнитным подвесом.**

Чем же привлекают разработчиков шаровые гироскопы? Преимуществ много. Прежде всего упрощается конструкция. Устраняется карданов подвес с его кольцами, опорами и их отрицательными следствиями, что позволяет практически перейти к миниатюризации гироприборов, к снижению веса, габаритов, материалоемкости. Бесконтактный подвес один выполняет функции всех опор классической схемы гироскопа — и опор ротора (скоростных опор), и опор карданова подвеса (чувствительных опор). В шаровом гироскопе принципиально устранено механическое трение, так как шар не только не касается стенок, но и не имеет трения о газовую среду — сферическая полость вакуумирована. Это дает надежду на получение высокой точности. Кстати, отсутствие газовой среды позволяет получить еще одно замечательное свойство шарового гироскопа. Ротор-шар, однажды приведенный во вращение, в дальнейшем может продолжать вращаться без дополнительных энергетических затрат на поддержание вращения. Вечный гироскоп? Вечный — едва ли, но по сообщениям зарубежной рекламы в течение года вращаться может. Остаточный газ (вакуум не идеален!) все-таки тормозит ротор. Как видим, у шаровых гироскопов преимуществ много. Но почему же они до сих пор не вытеснили классические гироскопы? Дело в том, что у шаровых гироскопов так же много и своих до конца не решенных проблем. Например, как раскрутить шар, как придать ему нужную ориентацию относительно корпуса, как снимать информацию о положении шара, как с высокой точностью уравновесить шар и при этом не испортить его поверхности, которая обрабатывается с точностью до десятых долей микрометра? Да и сами бесконтактные подвесы еще нуждаются в совершенствовании. Они пока еще очень «мягки», то есть создают не очень большие центрирующие силы. Исключив моменты механического трения, бесконтактные подвесы пока не исключили вредные моменты, действующие на ротор-шар вообще. Вместо моментов трения каждый тип бесконтактного подвеса создает свои специфические моменты тяжения, которые обусловливаются несовершенством изготовления ротора-шара и несовершенством самого подвеса. Эти моменты вызывают ошибки—

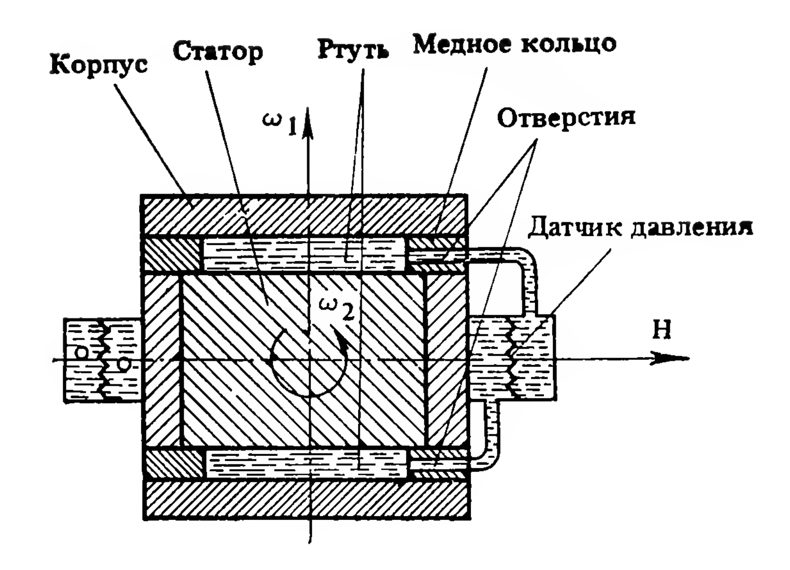
дрейф шарового гироскопа. У современных шаровых гироскопов недостатков еще много, что пока не позволяет им успешно конкурировать с классическими типами гироприборов.

Гироскоп без опор

Итак, опять: несовершенство опоры сдерживает применение перспективного гироскопического прибора. А нельзя ли создать гироскоп вообще без опор? Оказывается, можно, больше того, уже известно несколько разновидностей таких гироскопов, использующих различные физические принципы. Вот например, **магнитогидродинамический гироскоп.** Он подкупает предельной простотой устройства (рис. 30). В зазор, создаваемый корпусом прибора и статором, заливается жидкость (например, ртуть). С торцов кольцевой зазор закрыт медными кольцами. В каждом из колец имеется по одной паре диаметрально расположенных отверстий. Пары отверстий левого и правого колец расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Каждая пара отверстий сообщается с устройством, измеряющим давление жидкости, — с датчиком давления.

Статор создает в зазоре, заполненном ртутью, вращающееся магнитное поле, под действием которого ртуть, как ротор асинхронного двигателя, начинает вращаться — гироскоп готов к работе. Его маховиком является слой вращающейся ртути. Жидкий маховик очень удобен в производстве: ему не нужны опоры, и, следовательно, отпадают все проблемы, связанные с их применением; его не нужно статически и динамически уравновешивать, в результате чего исключаются сложнейшие технологические операции и существенные причины, приводящие к ошибкам гироприбора. Магнитогидродинамический гироскоп — это гироскоп с двумя степенями свободы. Но в отличие от классических гироскопов с двумя степенями свободы он может одновременно измерять скорость вращения основания вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Предположим, например, что вектор кинетического момента *H* жидкого маховика направлен слева направо Тогда при появлении угловой скорости ω_1 вращения корпуса, вектор которой направлен вверх, в жидкости воз-



никнут силы инерции, порожденные кориолисовыми ускорениями. Эти силы, создавая давление, попытаются переместить жидкость в верхней части

Рис. 30.
Схема магнитогидродинамического гироскопа

зазора, справа налево, а в нижней части зазора — слева направо. Давление жидкости будет восприниматься правым датчиком давления. В результате этого эластичная перегородка (мембрана) датчика давления прогнется слева направо. Величина прогиба мембраны оказывается пропорциональной величине угловой скорсти ω_1. По прогибу мембраны судят о величине и направлении угловой скорости ω_1.

Аналогично будет работать магнитогидродинамический гироскоп, если возникает угловая скорость ω_2, вектор которой перпендикулярен плоскости рис. 30. В этом случае информация об угловой скорости ω_2 будет сниматься с левого датчика давления. Таким образом, один магнитогидродинамический гироскоп может заменить сразу два классических двухстепенных гироскопа. Однако и магнитогидродинамические гироскопы пока практического применения не находят Дело в том, что очень трудно раскрутить слой ртути до больших угловых скоростей: с увеличением скорости вращения ртути растет и момент сопротивления ее вращению, порожденный трением ртути о неподвижные поверхности корпуса и статора. Нужно искать способы снижения этого трения. Если оставить скорости вращения слоя ртути малыми, то устройство съема информации — датчик давления — становится нечувствительным к малым угловым скоростям вращения корпуса. Как принято говорить, прибор становится грубым. Чтобы уменьшить этот недостаток, предложено большое количество других схем гироскопов с жидким маховиком — **гидродинамических гироскопов.** В некоторых из них предлагается гнать ртуть по кольцевому зазору с помощью специальных миниатюрных насосов, в других от дополнительного двигателя вращать корпус прибора, в котором содержится ртуть, в третьих

жидкий маховик предлагается делать в виде сложной многовитковой спирали... Есть даже предложение отказаться от ртути и сделать маховик из ...газа, сверхтекучего гелия. Предложений много, в них нужно разбираться, нужно проводить исследовательские работы, выяснять действительную ценность предложений.

Лазерный гироскоп

Гидродинамические гироскопы не единственный класс новых типов гироскопов, которые не нуждаются в специальных высококачественных опорах. Другой разновидностью безопорных гироскопов являются лазерные гироскопы. Своим рождением они обязаны... заблуждению некоторых авторитетных физиков, считавших, что свет распространяется с помощью специальной светоносной среды — эфира

В 1904 г. американский физик Майкельсон высказал идею постановки опытов, проверяющих гипотезу эфира В 1913 г. французский физик М. Саньяк провел эти опыты, для чего была сделана специальная установка. На платформу диаметром 0,5 м, которая могла вращаться вокруг вертикальной оси, были установлены источник света, система зеркал и линз, интерферометр. Световой луч, создаваемый источником света, разделялся на две части, которые шли в противоположных направлениях по периметру платформы и попадали на интерферометр— прибор, оценивающий волновые характеристики световых лучей. В качестве интерферометра Саньяк использовал обычную фотопластинку, на которой фиксировал полосы, возникающие в результате интерференции света. Видимо, Саньяк рассуждал так: «Если эфир есть, то вращение платформы не должно изменить интерференционную картину, так как свет транспортируется эфиром и вращение платформы здесь ни при чем. Если эфира нет и свет распространяется без посторонней помощи, то в результате вращения платформы интерференционная картина должна измениться, так как одна половина луча, прежде чем попасть на фотопластинку, пройдет большее расстояние, чем другая: интерферометр (фотопластинка) будет «убегать» от одной половины луча и «идти» навстречу другой половине.

Саньяк зафиксировал интерференционную картину

при неподвижной платформе, а затем при вращающейся. Интерференционная картина изменилась, что позволило Саньяку сделать два вывода, обессмертивших его имя. Первый — эфира нет, второй — установку можно использовать для обнаружения скорости вращения платформы «без всякого внешнего ориентира».

В дальнейшем ученые установили, что для использования установки типа интерферометра Саньяка в качестве датчика угловой скорости нужно разработать более чувствительные способы обнаружения разности хода лучей, чем применявшиеся ранее, а также применить многократный обход лучами контура. Поскольку при увеличении длины хода лучей неизбежно возрастание потерь света на отражение, было высказано предположение о возможности преодоления этих трудностей путем использования в качестве источников света оптических квантовых генераторов — лазеров. Так возник принципиально новый тип гироскопов — лазерные гироскопы. Существенным их отличием от всех рассмотренных ранее типов гироскопов является то, что для обнаружения вращения основания используется не механическое вращение какого-либо тела (твердого или жидкого), а свойства электромагнитных волн оптического диапазона.

Эта особенность обусловливает такие существенные преимущества лазерных гироскопов, как:

— отсутствие механически движущихся частей, а следовательно, и проблем, порождаемых этим движением;

— способность выдерживать большие линейные перегрузки;

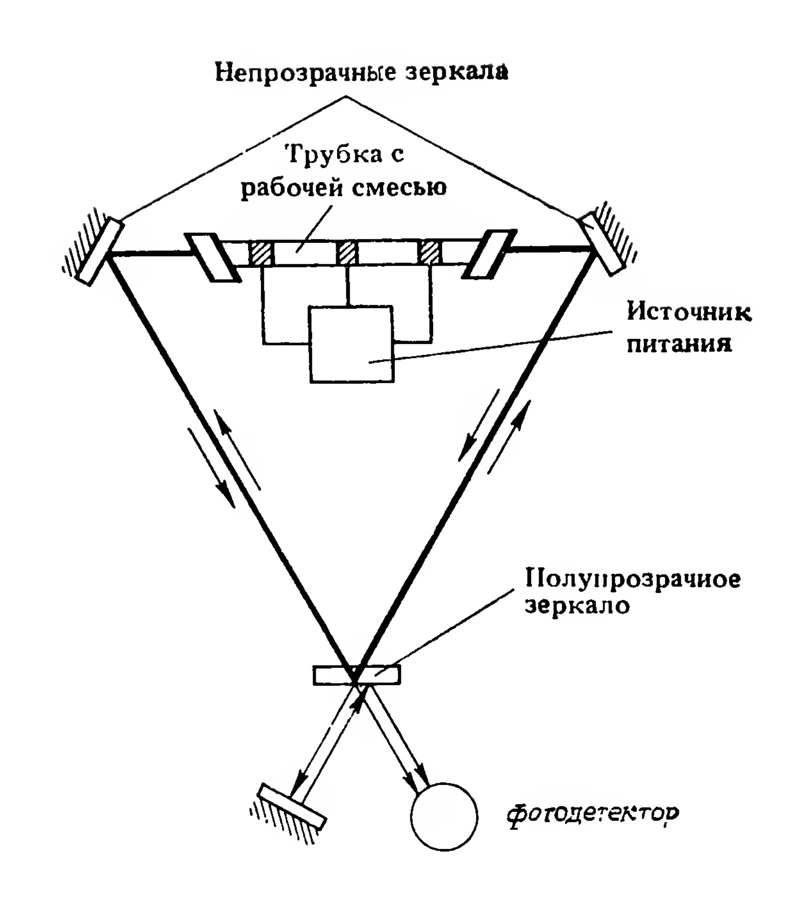
— дискретный характер выходного сигнала, что очень удобно для связи с вычислительной машиной;

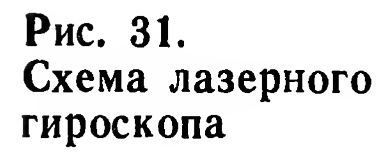
— большой срок службы;

— широкий диапазон измеряемых угловых скоростей.

Как же устроен лазерный гироскоп, обладающий такой совокупностью важных качеств? Схема устройства лазерного гироскопа принципиально не отличается от схемы установки Саньяка. Основным его элементом является лазер кольцевого типа. Форма кольцевого контура в простейшем случае треугольная (рис. 31). Кольцо образовано двумя непрозрачными и одним полупрозрачным зеркалами. В кольцо вводится одна или несколько трубок с газовой рабочей смесью (активным веществом). Это вещество возбуждается от источника питания высокочастотным (десятки мегагерц) или постоянным (на-

пряжение тысячи вольт) током. В результате возбуждения активного вещества (например, гелий-неоновой смеси) трубка начинает излучать свет в направлении непрозрачных зеркал. Отразившись от них, световые лучи попадают на полупрозрачное зеркало, которое




**Рис. 31.
Схема лазерного гироскопа**

часть лучей отражает, а другую часть пропускает. Направления хода пропущенных лучей совмещаются с помощью зеркала. Волновые фронты совмещенных лучей интерферируют, создавая интерференционные полосы, фиксируемые фотодетектором.

Вращение основания, на котором установлен лазерный гироскоп, приводит к тому, что интерференционные полосы начинают перемещаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения основания, в результате чего на выходе фотодетектора появляется электрический сигнал соответствующей частоты. Измеряя частоту сигнала, судят о величине угловой скорости вращения основания.

Первые лазерные гироскопы представляли собой довольно громоздкие и неуклюжие конструкции. Длина стороны платформы такого гироскопа составляла около 1 м, чувствительность его к угловой скорости была низкой Как тут не вспомнить знаменитого советского авиаконструктора А. Н. Туполева, однажды сказавшего: «Только красивые самолеты хорошо летают».

Началось совершенствование лазерных гироскопов. Современный лазерный гироскоп — это уже не «гадкий утенок», но еще и не «прекрасный лебедь». Как сообщает американская реклама, ведутся разработки трехосных лазерных гироскопов, все элементы которых размещаются внутри монолитного шара диаметром около 20 см, выполненного из кварца. Размеры гироскопа уже приближаются к размерам классических гироскопов,

хуже обстоят дела с точностью и стабильностью показаний. Здесь возникает много специфических проблем, среди которых: явление «захвата» лучей вращающимся основанием, что обусловливает нечувствительность лазерного гироскопа к малым угловым скоростям; проблема сохранения геометрических размеров контура с точностью до сотых и тысячных долей процента длины световой волны, для чего требуется поддержание температуры лазерного гироскопа с высокой точностью или сложнейшие системы компенсации; создание излучения с единственной длиной волны... Казалось, многие проблемы оптических (лазерных) гироскопов будут решены с созданием высококачественных световодов из оптического волокна, так как катушки, намотанные таким волокном, позволят увеличить периметр оптического контура до нескольких сот метров. Ожидалось резкое усиление эффекта Саньяка. Однако и в волоконно-оптическом гироскопе возникли свои проблемы... Следовательно, опять работа, работа и работа.

Весь мир состоит из гироскопов

И вдруг как гром среди ясного неба — новое утверждение зарубежной рекламы: «Зачем работать? Гироскопы сверхминиатюрные, идеально уравновешенные, не требующие затрат на изготовление, не потребляющие энергии, находятся в изобилии вокруг нас и даже внутри нас!» Первое, что приходит в голову после такого заявления: не может быть! Но самое интересное, что в данном случае реклама утверждает... истину.

В конце XIX в. было окончательно установлено, что атом больше не является неделимым, он состоит из элементарных частиц. Английский ученый Д. Томсон доказал, что атом содержит электрически отрицательно заряженную частицу, а другой английский ученый, специалист в области оптики, — Стоней дал ей название «электрон». Но атом в целом электрически нейтрален, значит, должна существовать и положительно заряженная частица.

Д. Томсон считал, что простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженный

шар радиусом около одной стомиллионной доли сантиметра (10^{-8} см), внутри которого находится электрон. У более сложных атомов в положительном шаре находится несколько электронов, так что атом подобен пирогу с маком, в котором роль маковых зерен играют электроны.

Модель строения атома, предложенная Д. Томсоном, не признавалась многими учеными, так как она противоречила некоторым физическим явлениям.

В 1906 г. уроженец Новой Зеландии великий английский физик Эрнест Резерфорд активно включился в работу по изучению строения атома. Ему помогают талантливые ученики: англичанин Джеймс Чедвик, датчанин Нильс Бор, русский Петр Капица...

С выдающимися результатами работ Резерфорда знакомы все, они вошли в школьные учебники. Представляет исключительный интерес и стиль работы Резерфорда. П. Капица дал Резерфорду прозвище Крокодил.

Всем любопытствующим он объяснял: «Это существо внушает нам и ужас, и восхищение... Оно никогда не поворачивает головы назад... Оно идет только прямо вперед — как наука, как Резерфорд» И добавлял: «Отношения с Резерфордом не являются обычными. Никто не может дружить со стихией». Резерфорд говорил о себе: «Я — простой человек. Это ясно и мне и каждому. Но ведь тогда и наука проста, если я, простой человек, занимаюсь ею с успехом». И действительно, опыты, поставленные им, отличались исключительной простотой, ясностью и эффективностью. Резерфорд считал, что природа по своей сущности проста, и если мы что-то объясняем сложно, то в этом проявляется лишь недостаток наших знаний.

Знания Резерфорда были обширны, интуиция уникальна, изобретательность гениальна. Благодаря остроумной идее с помощью простой лабораторной установки Резерфорду удалось доказать, что положительно заряженная частица атома имеет значительно меньшие размеры, чем сам атом. Дальнейшие расчеты показали, что диаметр атома составляет величину порядка 10^{-8} см, а диаметр положительно заряженной частицы — 10^{-12}... 10^{-13} см. А где же место для размещения электронов? Ведь внутри положительно заряженной частицы они разместиться не могут. Осталось одно — разместить их снаружи положительно заряженной частицы. Но здесь

опять возникла трудность: отрицательно заряженные частицы — электроны должны были в соответствии с законом Кулона мгновенно притянуться к положительно заряженной частице, а диаметр атома в результате этого должен был уменьшиться до размеров положительно заряженной частицы. Однако этого не происходило. И тогда Резерфорда осеняет гениальная догадка: электроны вращаются вокруг положительно заряженной частицы, как Земля вращается вокруг Солнца.

Так Резерфорд пришел к идее планетарной модели атома. Центр, вокруг которого вращаются электроны, представляет собой положительно заряженную частицу — тело малых размеров, в котором сосредоточены почти вся масса и весь положительный заряд атома Это тело Резерфорд образно назвал ядром атома. В дальнейшем было установлено, что ядро атома также не элементарная частица, в его состав входят более мелкие частицы, в частности протоны (положительно заряженные частицы) и нейтроны (электрически нейтральные частицы).

Но почему же ядро атома, обладая «всем» положительным зарядом, содержит «почти» всю массу атома? Где же недостающая часть массы? Оставшаяся часть массы сосредоточена в электронах. Но электроны вращаются! Вращаются материальные тела, хотя и обладающие очень малой массой. Следовательно, они обладают моментом количества движения. А это уже область гироскопических явлений!

Физики сделали гироскопистам богатый подарок Теперь, при желании гироскописты могут утверждать, что весь мир состоит из гироскопов. Ну а если отбросить этот шутливый аспект, то подарок — это исключительно широкое поле деятельности в необычной для гироскопистов области атомной физики. Конечно, и на этом направлении не все просто И хотя природные гироскопы — атомы — действительно существуют, практическое их использование пока затруднительно.

При более детальном ознакомлении с проблемой выясняются важные подробности.

Прежде всего оказалось, что электрон вращается не только вокруг ядра, но и вокруг своей оси, то есть обладает собственным моментом количества движения — спином. Наличие спина не является исключительной особенностью электрона. Наряду с электронами спином обла-

дают и другие микрочастицы, в частности протоны и нейтроны, имеющие то же значение спина, что и электроны.

Далее, движение электрически заряженной частицы — электрона по орбите вокруг ядра можно рассматривать как элементарный электрический ток. По законам электродинамики такой круговой ток должен создавать свое магнитное поле. Свои магнитные поля создают и все другие частицы, обладающие спином. Таким образом, атом — это сложное сочетание механических, электрических и магнитных явлений.

Магнитное поле, создаваемое вращающимся электроном, принято характеризовать так называемым магнитным моментом. Вообще магнитный момент есть произведение электрического тока на площадь контура, по периметру которого этот ток протекает. Магнитный момент — величина векторная, так как электрический ток может быть больше или меньше и может обтекать контур по ходу стрелки часов или против. Вектор магнитного момента перпендикулярен плоскости контура, обтекаемого током. Если магнитное поле создается вращающимся электроном, то вектор магнитного момента перпендикулярен плоскости орбиты электрона.

Вспомним, что момент количества движения (или, что то же самое, кинетический момент) есть также величина векторная. Поэтому полный момент количества движения (кинетический момент H) атома равен векторной (геометрической) сумме кинетических моментов электронной оболочки и частиц атомного ядра. Аналогично результирующий магнитный момент атома M равен векторной сумме магнитных моментов, создаваемых элементарными частицами. Следовательно, атом в целом можно представить как быстровращающийся ротор, обладающий кинетическим моментом H и магнитным моментом M. В общем случае векторы H и M жестко связаны между собою и пересекаются. Вектор H, если на атом не действуют внешние возмущения, сохраняет свое направление неизменным в абсолютном пространстве.

Итак, природный гироскоп существует, его не нужно изготавливать, к нему не нужно подводить энергию для поддержания вращения ротора, ему чужд износ, он безразличен к механическим перегрузкам, он всегда готов к действию. Но природа перестаралась, наделяя атом-гироскоп достоинствами: она создала его слишком малых размеров. Пока еще ни одному Левше не удалось

потрогать его или хотя бы рассмотреть в мелкоскоп. Пока гироскописты не могут оперировать с отдельным атомом, и это коренным образом меняет дело.

В научных лабораториях занимаются не с отдельными атомами, а с их ансамблями (числом до 10^{22}), проще говоря, с объемами различных, чаще всего жидких и газообразных, веществ: с водой, изотопами ртути, растворами солей, газами гелием, неоном. Но из повседневного опыта мы знаем, что ни одно покоящееся тело не проявляет гироскопических свойств. Происходит это потому, что атомов в любом теле очень много и расположены они беспорядочно, их кинетические моменты взаимно компенсируются. Чтобы превратить какой-либо объем вещества в гироскоп, нужно выстроить в одном направлении векторы кинетических моментов всех атомов. Но как это сделать? И вот здесь на помощь приходит магнитный момент атома. Наличие кинетического момента атома создает предпосылки использования его в качестве «маховика» гироскопа, а существование результирующего вектора магнитного момента атома дает возможность воздействовать на этот «маховик» (прикладывать к нему механические моменты) с целью придания его оси требуемой ориентации и съема показаний.

Существует несколько способов выстраивания (ориентации) кинетических моментов атомов. Наиболее наглядный, но не самый простой и эффективный — помещение рабочего вещества на некоторое время в сильное магнитное поле. В этом случае векторы магнитных моментов атомов, как стрелки магнитных компасов, постараются выстроиться вдоль силовых линий внешнего магнитного поля. Но поскольку векторы магнитного и кинетического моментов атома жестко связаны, то к атомам прикладываются управляющие моменты, которые стремятся упорядочить ориентацию векторов кинетических моментов, придав им одинаковые направления. В результате лишь через некоторое время да и то не все атомы выстроят свои кинетические моменты в одном направлении. И все-таки объем вещества на некоторое время приобретает свойства гироскопа с тремя степенями свободы. Это обнаруживается с помощью простого опыта. Сосуд, содержащий вещество с выстроенными в одном направлении векторами кинетических моментов атомов, устанавливается на платформу, которая может поворачиваться. При этом вектор магнитного момента ве-

щества занимает определенное, устойчивое положение в пространстве, так как он «стабилизирован» атомным гироскопом. Направление вектора магнитного момента вещества относительно корпуса сосуда определяется специальным устройством — датчиком направления, расположенным на корпусе сосуда. При повороте платформы установленный на ней корпус сосуда и датчик направления также повернутся, а результирующий вектор кинетического момента вещества и «стабилизированный» им вектор магнитного момента вещества останутся в прежнем положении. В результате этого на датчике направления появится сигнал — значит, атомный гироскоп действует, угол отклонения платформы обнаружен.

Атомный гироскоп несложно превратить и в устройство, реагирующее на угловую скорость основания, то есть придать ему свойства гироскопа с двумя степенями свободы.

Но, прежде чем приступить к практическому использованию атомных гироскопов, нужно решить ряд проблем. Одиночный атом-гироскоп хорош во многих отношениях, но пока не ясно, как к нему подступиться. Атомный гироскоп, содержащий большое количество атомов, пока «живет» недолго — десятки и сотни секунд. Под действием тепла и внешних магнитных полей ориентация атомов нарушается, векторы магнитных моментов отдельных атомов начинают принимать случайные положения, и рабочее вещество в целом теряет гиромагнитные свойства. Атомный гироскоп перестает существовать. Следовательно, чтобы превратить атомный гироскоп в «долгожителя», нужно прежде всего научиться сохранять выстроенную однажды ориентацию атомов Прямолинейный путь решения этой проблемы — применение криогенной техники и эффективных магнитных экранов. Но прямолинейный путь в технике не всегда лучший... Не до конца решены проблемы ориентации атомов и съема сигналов. Словом, атомный гироскоп только начинает жить.

Итак, новые типы гироскопов, несмотря на многие их привлекательные стороны, пока составляют слабую конкуренцию классическим типам. Объясняется это тем, что классический гироскоп как старейшина рода может сказать о себе: «Мои года — мое богатство». И действительно, если начать с первых технических применений, то классический гироскоп — ровесник века. Тысячи вы-

дающихся людей в течение многих десятилетий работали и продолжают работать над его совершенствованием. Этот громадный труд дал свои результаты: классические гироскопы достаточно хорошо изучены, налажено их производство, в основном ясны и те трудности, которые нужно преодолевать.

По-иному обстоят дела с новыми типами гироскопов. Они молоды — отсчитывают первые десятки лет своей жизни. Их много. Это распыляет силы исследователей, затрудняет глубину проработки. Они не так просты, как кажутся с первого взгляда. Проблемы, которые возникают при их разработке, чаще всего оказываются незнакомыми и даже неожиданными для исследователей.



ЛИТЕРАТУРА

Дородных В. П., Лобашинский В. А. Торпеды. — М.: Изд-во ДОСААФ СССР, 1986.

Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. — М.: Наука, 1985.

Ишлинский А. Ю. Механика идеи, задачи, приложения. — М.: Наука, 1985.

Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация .— М.: Наука, 1976.

Коган В. М., Чичинадзе М. В. Судовой гироазимут-компас «Вега». — М.: Транспорт, 1983.

Павловский М А. Теория гироскопов. — Киев.: Вища школа, 1986.

Пельпор Д. С., Осокин Ю. А.. Рахтеенко Е. Р. Гироскопические приборы и системы ориентации и стабилизации. — М.: Машиностроение, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Научно-популярное издание

Станислав Алексеевич ШЕСТОВ

ГИРОСКОП НА ЗЕМЛЕ, В НЕБЕСАХ И НА МОРЕ

Главный отраслевой редактор В. П. Демьянов
Редактор С. Н. Попова
Худож. редактор М. А. Гусева
Художник Н. В. Беляева
Техн. редактор А. М. Красавина
Корректор С. П. Ткаченко

ИБ № 10016

Сдано в набор 30.08.88. Подписано к печати 18.04.89. А08657. Формат бумаги 84×108 1/32. Бумага офсетная № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,40. Уч.-изд. л. 10,18. Тираж 50 000 экз. Заказ 9089. Цена 45 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 897712. Типография издательства «Коммунист». 410002, г. Саратов, ул. Волжская, 28.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

К 45-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне издательство «Знание» выпускает книгу Пархоменко А. А., Федорова А. С. «Сражающаяся наука».

Участие советских ученых в защите Родины — одна из самых славных страниц истории отечественной науки. В книге рассказывается, как закладывался научный потенциал Страны Советов в 20—30-е годы, какие жертвы понесла наша наука в результате разбойничьего нападения гитлеровских полчищ, как перебазировалась она в тыл, перестроилась на военный лад и стала ковать оружие победы, как удалось ей заново создать целые отрасли.

Повествование завершается рассказом о фундаментальных направлениях науки, начало которым было положено в годы войны, а расцвет пришелся на наши годы (ядерная энергетика, ракетная техника, физика плазмы, радиоэлектроника и др.).

45 к.